

Stefan Gronau

Mikrostrukturierung mittels
KrF-Excimerlaser

DIPLOMARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, 2009

Stefan Gronau

Mikrostrukturierung mittels
KrF-Excimerlaser

DIPLOMARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. St. Weißmantel

Zweitprüfer: Dipl.Ing. (FH) R. Böttcher

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Stefan Gronau:

Mikrostrukturierung mittels KrF-Excimerlaser

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik

Diplomarbeit, 2009

Kurzreferat

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Grundlagenuntersuchungen zur Lasermikrobearbeitung des Kunststoffs TOPAS, des Borosilikatglases D 263 T und des Werkzeugstahls der Werkstoffnummer 1.2365 durchgeführt, um deren prinzipielle Bearbeitbarkeit mittels KrF-Excimerlaser zu bestimmen.

Desweiteren wurden Versuche zur Erzeugung von Gitterstrukturen in Tantalfolie und Edelstahlfolie der Werkstoffnummer 1.4301 unternommen. Ziel dieser Versuche war vorrangig die Erzeugung kleinstmöglicher Stegbreiten.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung.....	2
3 Stand der Technik.....	3
3.1 Mikrobearbeitung	3
3.1.1 Fotolithografie.....	3
3.1.2 LIGA-Technik.....	4
3.1.3 Mikrospritzgießen	5
3.1.4 Konventionelle Mikrobearbeitungsverfahren.....	6
3.1.5 Lasermikrobearbeitung allgemein	9
3.1.6 KrF-Excimerlaser-Mikrostrukturierung	10
3.1.7 Überblick und Zusammenfassung	10
3.2 Excimerlaser	11
4 Geräte und Material	15
4.1 Aufbau und Eigenschaften der verwendeten Excimerlaseranlage	15
4.2 Eigenschaften der verwendeten Substratmaterialien	16
4.2.1 D 263 T.....	16
4.2.2 TOPAS COC	17
4.2.3 Tantal.....	18
4.2.4 Werkzeugstahl 1.2365.....	19
4.2.5 Edelstahl 1.4301	20
5 Abtragsuntersuchungen	21
5.1 TOPAS 5013	22
5.2 D 263 T	26
5.3 Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365	35
5.3.1 Erzeugung von Sackbohrungen in Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365.....	42
6 Strukturierung von Metallfolien	45
6.1 Bohrungen in 5 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301).....	45
6.2 Erzeugung von Gitterstrukturen in 5 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301)	46
6.3 Strukturierung von 50 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301)	51
6.4 Erzeugung von Gitterstrukturen in 50 µm dicker Tantalfolie	54

7 Versuche zur Minimierung des Reibungskoeffizienten bei Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365	56
8 Theorie zu Rotationsmasken	59
9 Zusammenfassung und Ausblick	62
 Abbildungsverzeichnis.....	 63
Tabellenverzeichnis.....	67
Literaturverzeichnis.....	68
Anlagen	71
Erklärung zur selbständigen Anfertigung der Arbeit	74

1 Einleitung

Das Gebiet der Mikrotechnologie ist ein weiterhin stark wachsendes Gebiet der modernen Technik. Entwickelte sich diese in knapp mehr als 10 Jahren schon in einen Markt, der im Jahr 2001 ein Volumen von über 60 Milliarden Euro besaß [1], wurde dieser Ende 2007 schon auf deutlich über 100 Milliarden Euro geschätzt [2]. Dabei ist weiterhin von einem Wachstum im zweistelligen Bereich auszugehen.

Diese Entwicklung führt auch dazu, dass immer höhere Anforderungen an die Miniaturisierung und der Strukturgenauigkeit gestellt werden, wobei diese bei gleichzeitig möglichst geringen Fertigungskosten für die unterschiedlichsten Materialien wie Metalle, Kunststoffe, Keramiken und Gläser gelten sollen.

Hierzu hat sich ein breites Gebiet an Verfahren zur Herstellung verschiedenster Mikrostrukturen entwickelt, wodurch für fast alle Anforderungen spezifische Lösungen zur Verfügung stehen. Diese Palette beinhaltet zum Beispiel die Fotolithografie, diverse Dünnschichttechniken, die LIGA-Technik, Spritzgieß- und Heißprägeverfahren, weiterentwickelte klassische Verfahren wie das Hochgeschwindigkeitsfräsen und Erodierverfahren, elektronenstrahlbasierte Techniken sowie die Bearbeitung mittels Laserstrahlung.

Hierbei eignet sich der Excimerlaser sehr gut, da sich die Strahlung durch eine sehr kurze Wellenlänge von 248 nm auszeichnet und damit entsprechend hohe Photonenenergien von 5,0 eV besitzt, welche im Zusammenhang mit einer sehr kurzen Pulsdauer für viele Materialien eine gute Ablation mit geringer thermischer Belastung der umliegenden Bereiche ermöglicht.

2 Aufgabenstellung

Die im Rahmen der Diplomarbeit geforderten Aufgaben umfassten folgende Gebiete:

- Literaturrecherche zur Mikrobearbeitung von technischen Gläsern und Kunststoffen, Metallen und dünnen Schichten mittels Excimerlaser-Pulsen und dem Vergleich mit anderen Mikrobearbeitungsverfahren sowie der Beschaffung und Auswertung der dafür nötigen Literatur.
- Einarbeitung in das Handling und die Softwaresteuerung der Eximerlaser-Mikrobearbeitungs-Anlage.
- Untersuchung der Abtragsprozesse, welche infolge der Wechselwirkung von Excimerlaser-Pulsen mit gehärtetem Borosilikatglas, dem Kunststoff TOPAS und ausgewählten Metallen auftreten sowie die Bestimmung der Abtragsschwellen und der Abtragsraten in Abhängigkeit von der Energiefluenz auf der Probenoberfläche.
- Einbringen von Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser und Tiefen in die Materialien sowie die Bestimmung der Aspektverhältnisse dieser und der Optimierung der Form und Qualität der Bohrungen.
- Erzeugung von Gitterstrukturen mit dem Ziel der Ermittlung des in Abhängigkeit vom Material und den Laserparametern erreichbaren minimalen Gitterabstandes, der erreichbaren Tiefe sowie der Querschnittsform der Strukturen in Abhängigkeit vom Gitterabstand.
- Erzeugung verschiedener Strukturen im Stahl X32 mit dem Ziel der Minimierung des Reibungskoeffizienten.

3 Stand der Technik

3.1 Mikrobearbeitung

Für die Herstellung von Körpern und geometrischen Strukturen im Mikrometerbereich ($0,1\ \mu\text{m}$ – $1000\ \mu\text{m}$) gibt es heutzutage die verschiedensten Verfahren, welche durch bestimmte Besonderheiten und den damit zusammenhängenden Vor- und Nachteilen gekennzeichnet sind und damit spezielle Aufgabenfelder besitzen.

Im Folgenden sollen hierbei ausgewählte Verfahren erläutert werden.

3.1.1 Fotolithografie

Die Fotolithografie besitzt die größte Bedeutung für die Erzeugung von Strukturen in der Halbleitertechnik.

Hierbei werden Strukturinformationen mit Hilfe einer Maske in Fotoresist übertragen, welches zuvor auf eine Funktionsschicht – befindlich auf einem Substrat – aufgebracht wurde. Diese Strukturinformationen können dadurch auch auf die Funktionsschicht übertragen werden. Man unterscheidet zwischen additiver und subtraktiver Methode: Bei der additiven wird Material in den Bereichen platziert, wo beim Entwickeln der Fotoresist entfernt wurde, bei der subtraktiven dagegen wird die Funktionsschicht im Bereich des entfernten Fotoresists zum Beispiel durch Ätzen entfernt.

Abbildung 3.1 zeigt schematisch die Prozessschritte der subtraktiven Strukturübertragung bei der Fotolithografie:

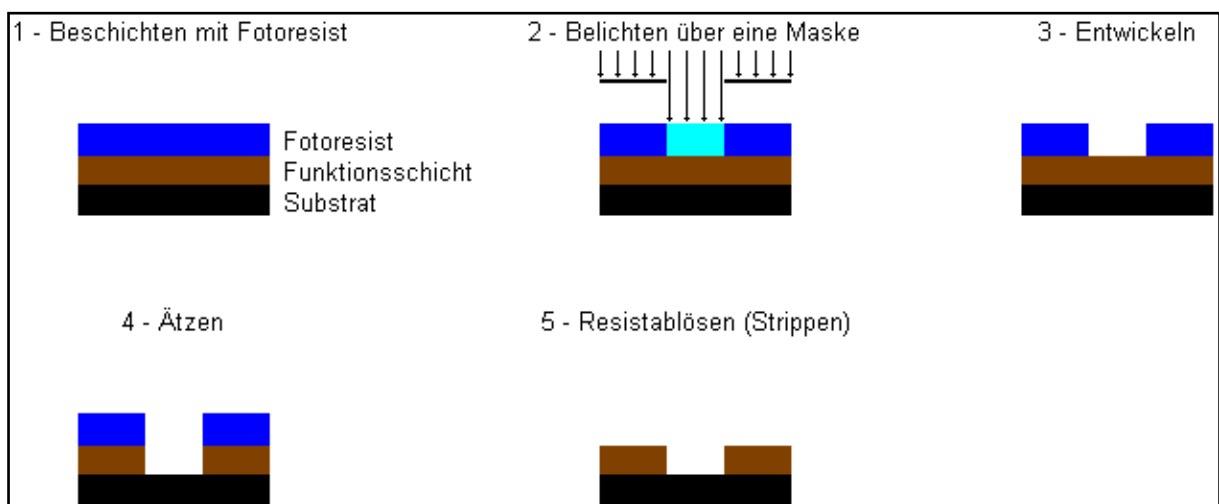


Abb. 3.1: Schematischer Verfahrensablauf zur Strukturdefinition mittels Fotolithografie (subtraktive Methode).

Die Belichtung erfolgt dabei unter anderem durch Quecksilberlampen sowie KrF- und ArF-Excimerlasern. Mit einem ArF-Excimerlaser der Wellenlänge 193 nm können dabei mit Hilfe der Immersion, bei der die Grenzen der Abbildungsgenauigkeit durch ein brechendes Medium mit hoher Brechzahl, das sich zwischen Projektionslinse und Fotolack befindet, verbessert wird, Strukturbreiten von 40 nm hergestellt werden. Neueste Entwicklungen in diesem Bereich ermöglichen die Herstellung von Transistoren mit einer Größe von 32 nm [3]. Als alternatives Lithografieverfahren kommt die Laserlithografie zur Anwendung. Hierbei werden Excimer-Laser mit ultrakurzen Pulsen eingesetzt, deren Ein-Photonen-Energie die Absorptionsschwelle des fotosensitiven Mediums nicht erreicht, wodurch dieses für die verwendete Laserstrahlung transparent ist. Durch eine starke Fokussierung des Laserstrahls kommt es jedoch zu Mehrphotonen-Absorptionsprozessen, was im fokussierten Bereich zu einer Modifikation des Mediums führt. Somit können mit Hilfe eines Entwicklers nahezu beliebige 3D-Strukturen erzeugt werden. Die hierbei minimal erreichbaren Linienbreiten liegen im Bereich von 150 nm [4].

3.1.2 LIGA-Technik

Die LIGA-Technik ist ein Verfahren, bei dem mittels **L**ithografie, **G**alvanik und **A**bformung Mikrostrukturen aus verschiedenen Kunststoffen, Metallen und Keramiken hergestellt werden können, deren kleinste Strukturdetails laterale Abmessungen bis zu 0,2 µm besitzen und Strukturhöhen von bis zu drei Millimetern und Aspektverhältnisse von bis zu 500 realisiert werden können.

Nicht zuletzt die durch Rapid Prototyping oder Replikationsverfahren kostengünstige Fertigung großer Stückzahlen sind hierbei für besonderen Nutzen für die Industrie, sondern auch die Möglichkeit, Bauteile mit nahezu beliebigen lateralen Geometrien herzustellen, deren Seitenwandrauhigkeiten unter 50 nm liegen [5].

Abbildung 3.2 zeigt hierbei die grundlegenden Prozessschritte der LIGA-Technik.

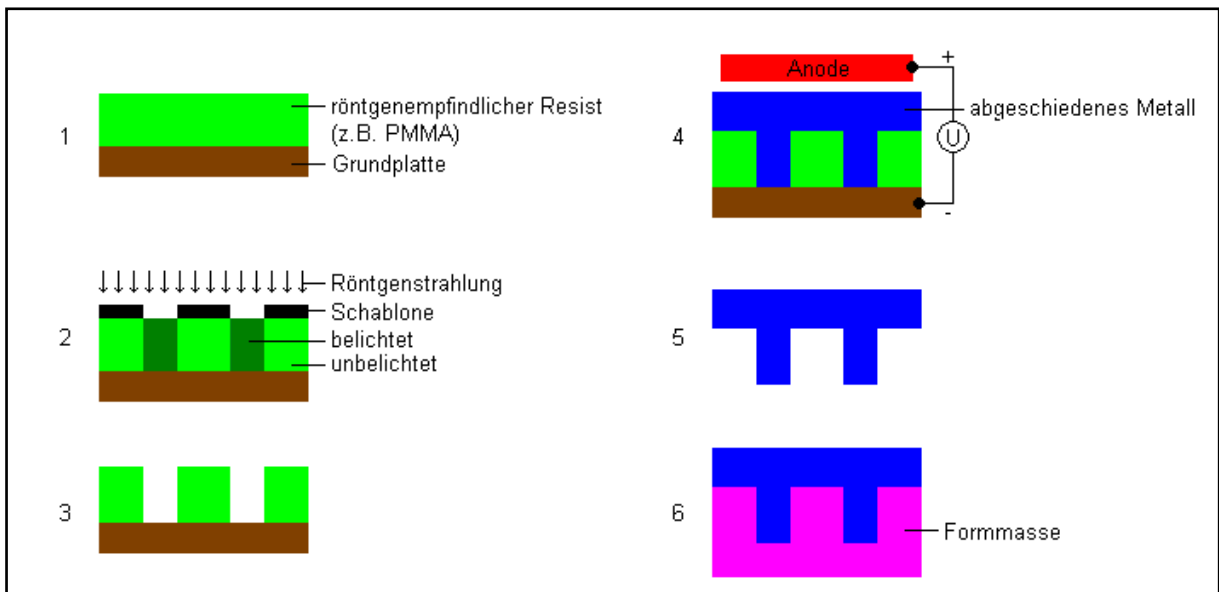


Abb. 3.2: Grundlegende Prozessschritte der LIGA-Technik 1) Aufbringen eines röntgenempfindlichen Resists auf eine Grundplatte 2) Bestrahlung mit Synchrotronstrahlung (Röntgenstrahlung) 3) Entwicklung des Resists 4) Galvanische Metallabscheidung 5) Entfernen des unbelichteten Resists 6) Abformung der Metallstruktur.

3.1.3 Mikrospritzgießen

Stark an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnt derzeit das Mikrospritzgießen, das als Herstellungsverfahren für Produkte der Mikrosystemtechnik, bestehend aus Komponenten von Polymeren, Metallen und Keramiken, Verwendung findet. Große Chancen werden dabei dem Zwei-Komponenten-Mikrospritzgießen eingeräumt, bei dem zeitgleich oder zeitlich versetzt mindestens zwei unterschiedliche Formmassen eingespritzt werden, um Verbundteile schon während der Formgebung zu erzeugen.

Als Variante des Mikrospritzgießens wird auch das Mikro-Pulverspritzgießen eingesetzt, welches im Wesentlichen aus den Teilschritten Formmassenherstellung, Formgebung durch Spritzgießen, Entbinden und Sintern besteht. Dabei wird zunächst durch Versatz mit einem polymeren Bindersystem die Formmasse aus einem Metall- bzw. Keramikpulver hergestellt, die durch eine geringfügig modifizierte Spritzgießmaschine zu einem Formteil verarbeitet werden kann. In einem speziellen Entbinderofen wird der Polymerbinder thermisch und/oder durch chemische Reaktionen entfernt. Mit Hilfe eines Hochtemperaturofens wird das übrig gebliebene Pulvergerüst schließlich zum eigentlichen Bauteil gesintert, welches über 95 % seiner theoretischen Dichte besitzt [6].

Stand 2006 können durch die Mikrospritzverfahren materialabhängig Details unter drei Mikrometern (Zirkonium(IV)-oxid) bzw. 50 µm für den Edelstahl 316L erzeugt werden [6].

Geeignet ist das Zwei-Komponenten-Mikrospritzverfahren auch dafür, Kunststoffformen herzustellen, die aus einem leitfähigen Substrat und isolierenden Strukturwänden in der Form bestehen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, durch galvanische Abscheidung Metall-Mikrobauteile in den Zwei-Komponenten-Spritzgussformen herzustellen, die sehr gute Oberflächenqualitäten und feinste Strukturierungsmöglichkeiten bietet [7].

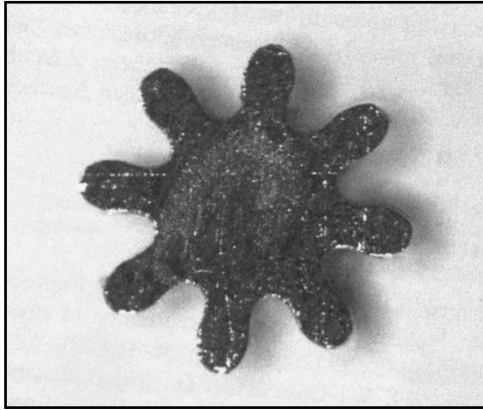


Abb. 3.3: Vereinzelttes Mikrozahnrad aus Nickel mit einem Kopfkreisdurchmesser von ca. 550 µm und einem Rauheitswert $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ [7].



Abb. 3.4:
Polypropylen-Teile für die Medizintechnik mit einem Teilgewicht von 0,001 g [8].

3.1.4 Konventionelle Mikrobearbeitungsverfahren

Unter den konventionellen Mikrobearbeitungsverfahren sollen Verfahren gemeint sein, die ihren Ursprung in der Makrotechnologie besitzen. Unter anderem zählen dazu das Fräsen, Bohren, Drehen, Schleifen und Erodieren im Mikrometerbereich.

Diese Verfahren stoßen jedoch an mechanische Grenzen und müssen sich mit Effekten auseinandersetzen, denen im makroskopischen Prozess keine praktische Bedeutung zukommt. So nimmt z.B. bei der Mikrozerspanung das Flächenträgheitsmoment bei abnehmendem Durchmesser mit der vierten Potenz ab (Gl. 1), so dass extrem hohe Drehzahlen erforderlich sind, welche in der Literatur mit bis zu 250.000 Umdrehungen pro Minute angegeben werden [9]. Dies hat jedoch auch den Vorteil, dass aufgrund des Kreiseffektes das Werkzeug durch die hohen Drehzahlen stabilisiert wird.

$$I_A = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (\text{Gl. 1})$$

Stand 2007 wurden bisher Mikrofräser mit einem Durchmesser von 100 μm und einem Aspektverhältnis 10 angeboten, für Versuchsreihen wurden Werkzeuge mit einem Durchmesser von nur 30 μm hergestellt. Die Hartstoffbeschichtung dieser gestaltet sich dabei schwierig, da es hierbei zu Droplet-Bildungen kommt, welche die Schneidkante verrunden und einen Anstieg der Schnittkräfte zur Folge hat (s. Abbildungen 3.5 und 3.6) [10].

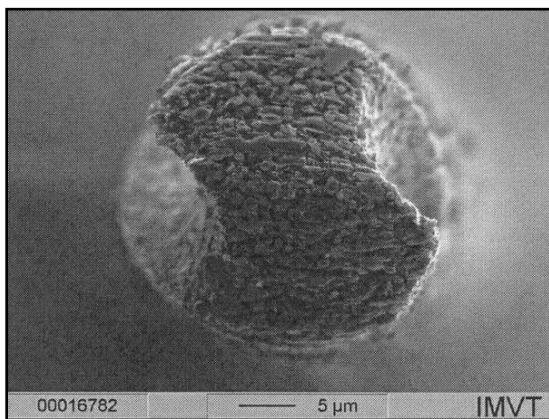


Abb. 3.5: Droplets auf einem 30 μm -Mikrobohrer [10].

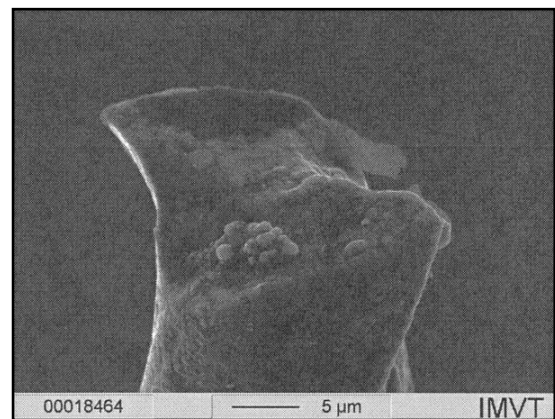


Abb. 3.6: Detail eines 30 μm -Mikrofräasers von Hitachi mit leichter Droplet-Bildung der Th45+-Beschichtung [10].

Die von der Firma Hitachi beschichteten 30 μm -Werkzeuge besaßen daher eine sehr geringe Stabilität und ein Aspektverhältnis von nur 1,5, wodurch ein Einsatz dieser unzweckmäßig ist.

Hobelwerkzeuge dagegen sind nicht rotationssymmetrisch, wodurch sie wesentlich stabiler sind und sich dadurch höhere Aspektverhältnisse und kleinere Strukturdetails realisieren lassen (Abb. 9).

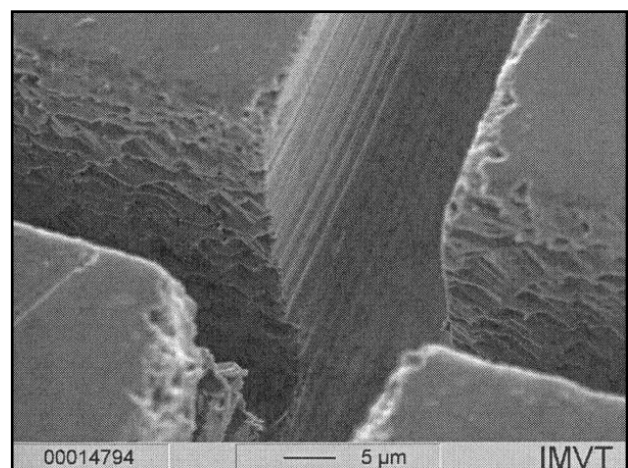


Abb. 3.7:
Grabenstruktur mit ca. 15 μm Breite und einer Tiefe von mehr als 150 μm , hergestellt durch Mikrohobeln in PMMA [10].

Als eine erhebliche Technologieerweiterung hat sich in den letzten Jahren das Mikroerodieren herausgestellt, mit dem Strukturen unterhalb von einem Mikrometer realisiert werden können. Dieses Verfahren beruht auf einem elektrischen Entladevorgang zwischen einer Elektrode und einem elektrisch leitenden Werkstück, wobei die Elektrode so nah an das Werkstück herangeführt wird, bis ein Funken überschlägt, der das Werkstückmaterial verdampft.

So sind mit dieser Technik mittlerweile Mikrobohrungen mit einem Durchmesser von 25 μm (Abbildung 3.8), Blenden mit den Abmessungen 50 μm x 25 μm und zahlreiche Komponenten für Mikropumpen, Mikromotoren, Einspritzdüsen, Ventile und Mikroreaktoren realisierbar [10].

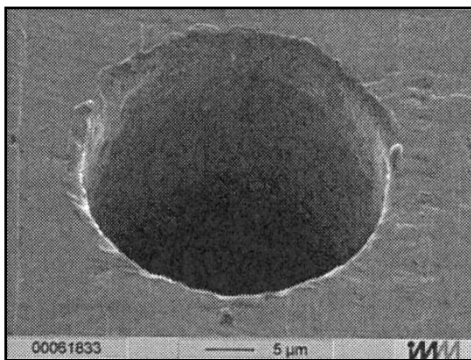


Abb. 3.8: Bohrung in Edelstahl mit einem Durchmesser von 25 μm [10].

Mittels Achsenrotation können durch das Mikroerodieren auch rotationssymmetrische Werkstücke hergestellt werden, wodurch man hierbei auch von einem „erosiven Drehen“ spricht. Hierbei können Bauteile hergestellt werden, die mit spanenden Drehverfahren aufgrund der hohen Schnittkräfte vor allem bei härteren Materialien nicht möglich sind.

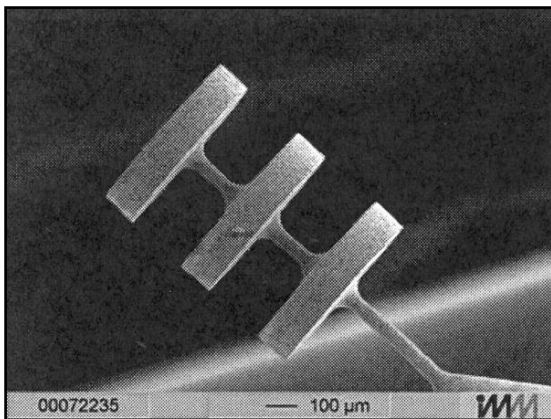
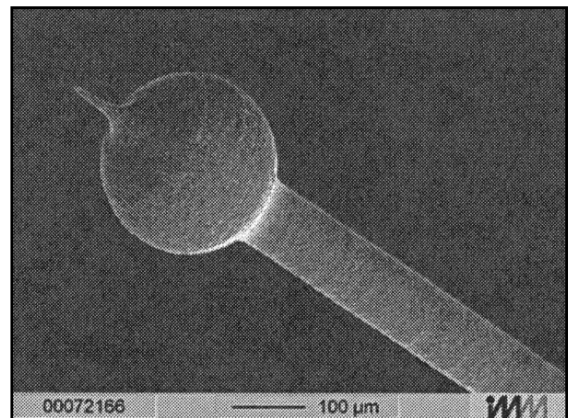


Abb. 3.9.: Mikroformelektrode zur Erzeugung von drei Rechteckeinstichen in einer Bohrung mit einem Durchmesser von 0,6 mm [10].

Abb. 3.10:
Nullstrahlfänger für Synchrotron-Röntgenstrahlen,
Kugeldurchmesser 0,25 mm, Tip-Durchmesser 10 μm
[10].



Für das Mikroschleifen werden heutzutage Diamantschleifbeläge verwendet, die durch chemische Gasphasenabscheidung erzeugt werden. Der hierbei feinste bislang getestete Schleifbelag besaß eine Körnung von 0,5 µm und einen Kornüberstand von 0,2 µm, wobei Werkstückrauheiten R_a von 5 nm erreicht wurden [11].

3.1.5 Lasermikrobearbeitung allgemein

Die Mikrobearbeitung mittels Laser bzw. laserunterstützte Verfahren sind mittlerweile aus der modernen Technologie nicht mehr wegzudenken. Die im Allgemeinen gute Fokussierbarkeit und die sich bietenden Möglichkeiten, nahezu jedes Material unter vergleichsweise geringen Wärmeeinflüssen bearbeiten zu können, schafft hierbei die perfekte Grundlage für die Mikrobearbeitung. Allerdings stehen dafür auch unterschiedlichste Laser zur Verfügung, die aufgrund ihrer Wellenlänge, Laserleistung, Frequenz und Pulsdauer jeweils nur für bestimmte Materialien geeignet sind.

So ist die Absorption der Laserstrahlung wesentlich abhängig von der verwendeten Wellenlänge, wodurch nicht jedes Material mit jedem Laser bearbeitet werden kann. Weiterhin ist die Fokussierung des Laserstrahles abhängig von der Wellenlänge und dem Beugungsbegrenzungsfaktor M^2 , welcher ein Maß für die Strahlqualität ist, die wiederum abhängig vom Resonatoraufbau ist (Gl. 2).

$$w_{fokus} = M^2 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot w_0} \quad (\text{Gl. 2})$$

w_{fokus} – **Fokusradius**

M^2 – **Beugungsbegrenzungsfaktor**

f – **Brennweite**

λ – **Wellenlänge**

w_0 – **Strahlradius vor der Fokussieroptik**

Der Beugungsbegrenzungsfaktor M^2 ergibt sich hierbei aus dem Quotienten des realen und des idealen Strahlparameterprodukts und kennzeichnet, um welchen Faktor der emittierte Laserstrahl vom Ideal abweicht.

Der Laser als Bearbeitungswerkzeug ist für viele Anwendungen in der Mikrobearbeitung geeignet. So ergeben sich für das Lasermikroschweißen, -schneiden, -bohren, -abtragen, -gravieren und -polieren und weiteren Verfahren wie dem Laserstrahlbeschichten, dem Laserstrahlbiegen und dem selektiven Lasersintern vielfältige Einsatzgebiete.

3.1.6 KrF-Excimerlaser-Mikrostrukturierung

An der im Rahmen der Diplomarbeit verwendeten Mikrostrukturierungsanlage wurden schon weitere Materialien wie Al_2O_3 - und ZrO_2 -Keramik, PMMA und Pyrex-Glas bearbeitet. Dabei ergab sich vor allem für die Al_2O_3 -Keramik und PMMA eine gute Strukturierbarkeit.

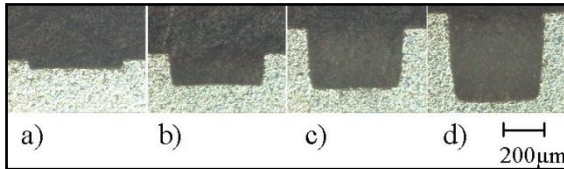


Abb. 3.11: Lichtmikroskopaufnahmen der Schlifffbilder einer erzeugten Struktur in Al_2O_3 a) 350 Pulse, b) 1500 Pulse, c) 3000 Pulse und d) 4000 Pulse ($H = 20 \text{ J/cm}^2$, $f_P = 5 \text{ Hz}$) [12].

Für die ZrO_2 -Keramik ergaben sich deutlich höhere Wandwinkel als für die Al_2O_3 -Keramik [13]. Bei der Strukturierung von Pyrex-Glas kam es zu einer Rissbildung aufgrund thermisch induzierter Spannungen im Material [14].

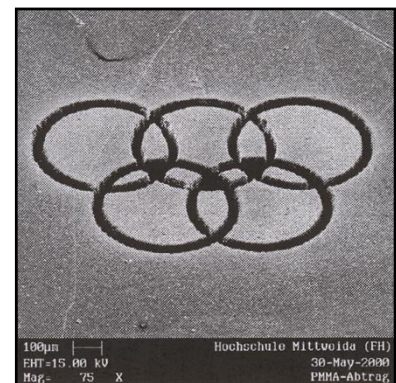


Abb. 3.12: Strukturierung in PMMA [13].

3.1.7 Überblick und Zusammenfassung

Je nach Anforderungen an die Art und Qualität der herzustellenden Mikrostrukturen können also verschiedenste Technologien angewendet werden. Eine große Rolle für den Einsatz bestimmter Verfahren stellt auch die Wirtschaftlichkeit dieser dar, die sich durch die entstehenden Kosten und dem Zeitaufwand zur Herstellung der Strukturen ergibt. In nachfolgender Tabelle sind die wichtigsten Mikrobearbeitungsverfahren mit ihren in der Literatur gefundenen Bearbeitungsmöglichkeiten aufgeführt.

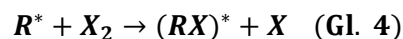
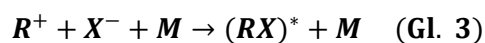
Tabelle 1: Mikrobearbeitungsverfahren und ihre Mikrostrukturierungsmöglichkeiten.

Verfahren	Kleinste herstellbare Strukturen	Bearbeitbare Materialien	Bemerkungen
Fotolithographie [3]	40 nm	Metalle	Maximale Strukturhöhe 20-25 µm
LIGA-Technik [5]	0,2 µm	Kunststoffe, Metalle, Keramiken	Maximale Strukturhöhen von 3 mm, Aspektverhältnisse bis 500
Mikrospritzgießen [6], [7], [8]	Materialabhängig 200 µm (für Kunststoff PP) bis 550 µm (für Edelstahl 316L), Strukturdetails 3 µm (bei ZrO ₂) bis 50 µm (Nickel)	Kunststoffe, Metalle, Keramiken	
Mikrofräsen [10]	Ø 100 µm	Kunststoffe, Metalle, Keramiken	Für 100 µm Ø Aspektverhältnis von 10 erreichbar
Mikrohobeln [10]	15 µm	Kunststoffe, Metalle, Keramiken	Für Spurbreiten von 15 µm Tiefen von 150 µm in PMMA erreichbar
Mikroerodieren [10]	Ø 25 µm	Metalle	
Erosives Drehen [10]	Ø 10 µm	Metalle	Für rotations-symmetrische Teile
Mikroguss [15], [16]	700 µm, Struktur-details 20 µm	Metalle	
Nanoimprint-Verfahren [17]	5 nm	Metalle, Kunststoffe	

3.2 Excimerlaser

Excimerlaser gehören zur Gruppe der Gaslaser und arbeiten mit elektronisch angeregten Molekülen. Der Begriff „Excimer“ steht dabei für „Excited Dimer“ (dt. „angeregtes Molekül“ / „angeregter Molekülverbund“). Überwiegend wird bei Excimerlasern aber ein Edelgashalogenidgemisch als aktives Medium genutzt, wodurch korrekterweise der Begriff „Exciplexlaser“ (von „excited complex“, dt. „angeregter Komplex“) verwendet werden müsste.

In Abb. 3.11 kann man die Potentiallinien der angeregten Zustände sowie der des Grundzustandes erkennen. Angeregte Edelgasatome ähneln chemisch gesehen einem Alkaliatom, wodurch sich Edelgashalogenide bilden. Die Excimere bzw. Exciplexe werden dabei durch folgende Reaktionen gebildet:



Das R entspricht hierbei einem Edelgasatom, das X einem Halogenatom und das M einem dritten Stoffpartner wie Helium oder Neon, welcher an der ersten Reaktion aufgrund der Energie- und Impulserhaltung beteiligt sein muss.

Die Symbole $^2\Sigma$ und $^2\Pi$ in Abb. 3.11 stehen für die Elektronenbindung zwischen den beiden Atomen, welche sich durch den Spindrehimpuls S und dem Bahndrehimpuls L zu ^{2S+1}L ergibt. Analog der Bezeichnungen für die Elektronenorbitale im Atom (s,p,d,...) werden hierbei große griechische Buchstaben verwendet.

Erkennbar ist, dass sich für kleine internukleare Abstände die Potentialkurven im ersten elektronisch angeregten Zustand wie auch im Grundzustand in zwei Zustände $^2\Sigma$ und $^2\Pi$ aufspalten. Dabei ist der $^2\Pi$ -Grundzustand immer stark repulsiv. Der Zustand $^2\Sigma$ dagegen ist praktisch flach bzw. nur leicht gebunden, so dass diese Moleküle thermisch instabil sind und mit einer mittleren Lebensdauer von 10^{-12} s dissoziieren [18]. Demgegenüber steht die mittlere Lebensdauer des oberen Laserniveaus mit rund 10 ns, wodurch eine Besetzungsinversion relativ leicht zu bewerkstelligen ist.

Der Laserübergang erfolgt vom ersten angeregten, gebundenen elektronischen Zustand zum elektronischen Grundzustand, jedoch wird die Laseraktivität durch verschiedene Fotoabsorptionsprozesse beeinflusst. So kann es zu einer Fotodissoziation der Halogenmoleküle X_2 kommen, die an der Reaktion (4) beteiligt sind. Auch eine Selbstabsorption der angeregten Edelgashalogenidexciplexe $(RX)^*$ und eine Fotoionisation der angeregten Edelgasatome und -moleküle kann erfolgen.

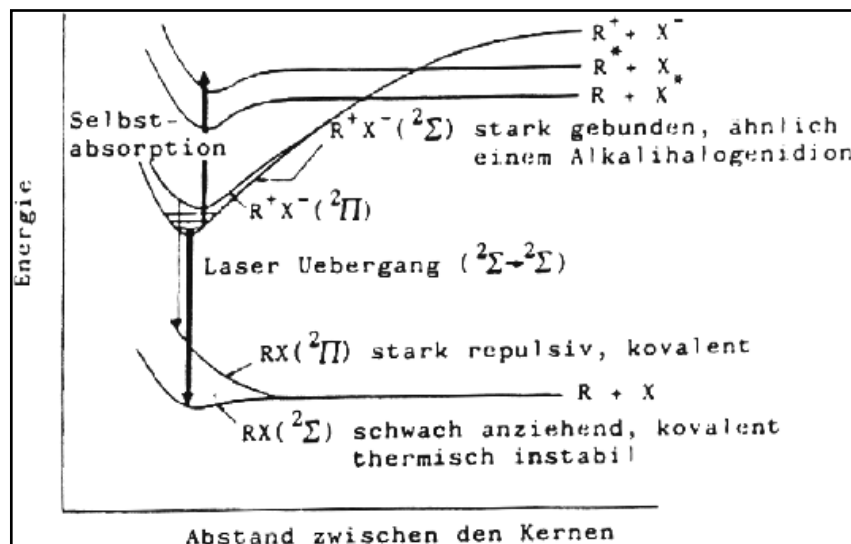


Abb. 3.13: Energiepotentiale der Edelgashalogenide [18].

Durch die kleine Verstärkung bei Excimerlasern müssen diese sehr stark gepumpt werden. Dies kann durch Elektronenstrahlbeschuss, einer Hochspannungsentladung oder einer Kombination aus beidem erreicht werden. Kommerziell verfügbare Excimerlaser werden in der Regel mit einer gepulsten Hochspannungs-DC-Entladung gepumpt, weshalb hier nur der dafür nötige Aufbau näher betrachtet werden soll:

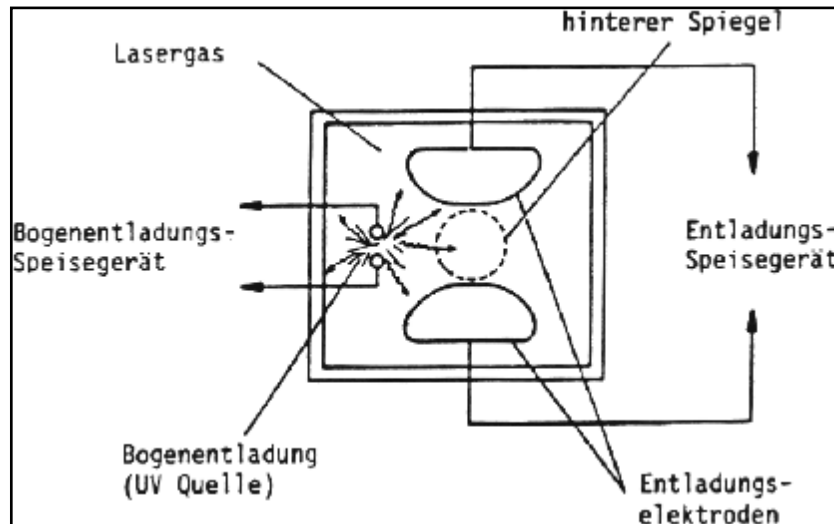


Abb. 3.14: Schema eines Excimerlasers, der mit einer elektrischen Entladung gepumpt wird [18].

Die bei der Bogenentladung entstehenden Leistungsdichten müssen im Bereich von 200 MW pro Liter Gasvolumen liegen, um eine ausreichende Verstärkung für den Laserbetrieb zu gewährleisten [18], was über einen längeren Zeitraum nicht aufrecht erhalten werden kann. Bei den verwendeten hohen Gasdrücken von 1,5 bis 3,5 bar geht die Bogenentladung nach wenigen 10 ns in eine Glimmentladung über [18], wodurch alle Excimerlaser nur gepulst betrieben werden können.

Die Strahlung von Excimerlasern weist eine sehr geringe zeitliche und räumliche Kohärenz auf, was auf die kurze Laseremission zurückzuführen ist. Dadurch sind nicht sehr viele Resonatorumläufe möglich, was zu einem Anschwingen von $10^5 - 10^7$ Moden führt. Deshalb ist die Excimerlaserstrahlung für eine direkte Fokussierung ungeeignet, sondern sie muss erst homogenisiert werden und es wird eine Maskenprojektion für die Formung des Laserstrahls notwendig.

Excimerlaser stellen die bisher intensivsten UV-Quellen dar. Die in Laboranordnungen erreichten Pulsspitzenleistungen betragen mehr als 10^7 Watt [18], die Pulsenergien liegen im kJ-Bereich. Aufgrund der kurzen Wellenlänge von 157 - 351 nm lässt sich die Strahlung auf einen sehr kleinen Brennfleck fokussieren, wodurch Leistungsdichten von über 10^{15} W/cm² möglich sind.

Als Excimerlasermedien haben sich insbesondere F_2^* , ArF^* , KrF^* , $XeCl^*$ und XeF^* bewährt. Die derzeit kommerziell angebotenen Laser der Firmen Coherent, Cymer, ATL Lasertechnik GmbH, GAM Laser, Nederlands Centrum voor Laser Research B.V und Radiant Dyes Laser Acc. liegen im folgenden Parameterbereich:

Tabelle 2: Parameterbereiche der zurzeit kommerziell angebotenen Excimerlaser.

Parameter \ Lasermedium	F_2^*	ArF^*	KrF^*	$XeCl^*$	XeF^*
Wellenlänge λ in nm	157	193	248	308	351
Max. Repetitionsrate in Hz	10 – 2000	10 – 6000	10 – 4000	10 – 2000	10 – 2000
Pulsdauer τ_p in ns	2 – 35	2 – 35	2 – 35	2 – 200	2 – 35
Max. Durchschnittsleistung P_{av} in W	0,2 – 7	1 – 90	2 – 300	2,5 – 1000	1 – 35
Max. Pulsenergie in mJ	0,5 - 50	1 - 600	4 - 1100	8 - 1050	6 - 400

Hierbei wurde die maximale Pulsenergie unter Verwendung von Einzelpulsen bestimmt und die maximale Durchschnittsleistung P_{av} unter Verwendung der höchstmöglichen Repetitionsrate.

Die stärksten – in Bezug auf die maximale Durchschnittsleistung P_{av} – zurzeit von den oben genannten Firmen kommerziell angebotenen Excimerlaser arbeiten mit folgenden Parametern:

Tabelle 3: Parameter der im Bezug auf die max. Durchschnittsleistung stärksten zurzeit kommerziell angebotenen Excimerlaser.

Parameter \ Lasermedium	F_2^*	ArF^*	KrF^*	$XeCl^*$	XeF^*
Wellenlänge λ in nm	157	193	248	308	351
Max. Repetitionsrate in Hz	200	6000	300	1000	100/200
Pulsdauer τ_p in ns	15	k.A.	32	200	20
Max. Durchschnittsleistung P_{av} in W	7	90	300	1000	35
Max. Pulsenergie in mJ	40	15	1000	1000	400/200

4 Geräte und Material

4.1 Aufbau und Eigenschaften der verwendeten Excimerlaseranlage

Die zur Verfügung stehende Lasermikrobearbeitungsanlage der Hochschule Mittweida besaß folgenden Aufbau:

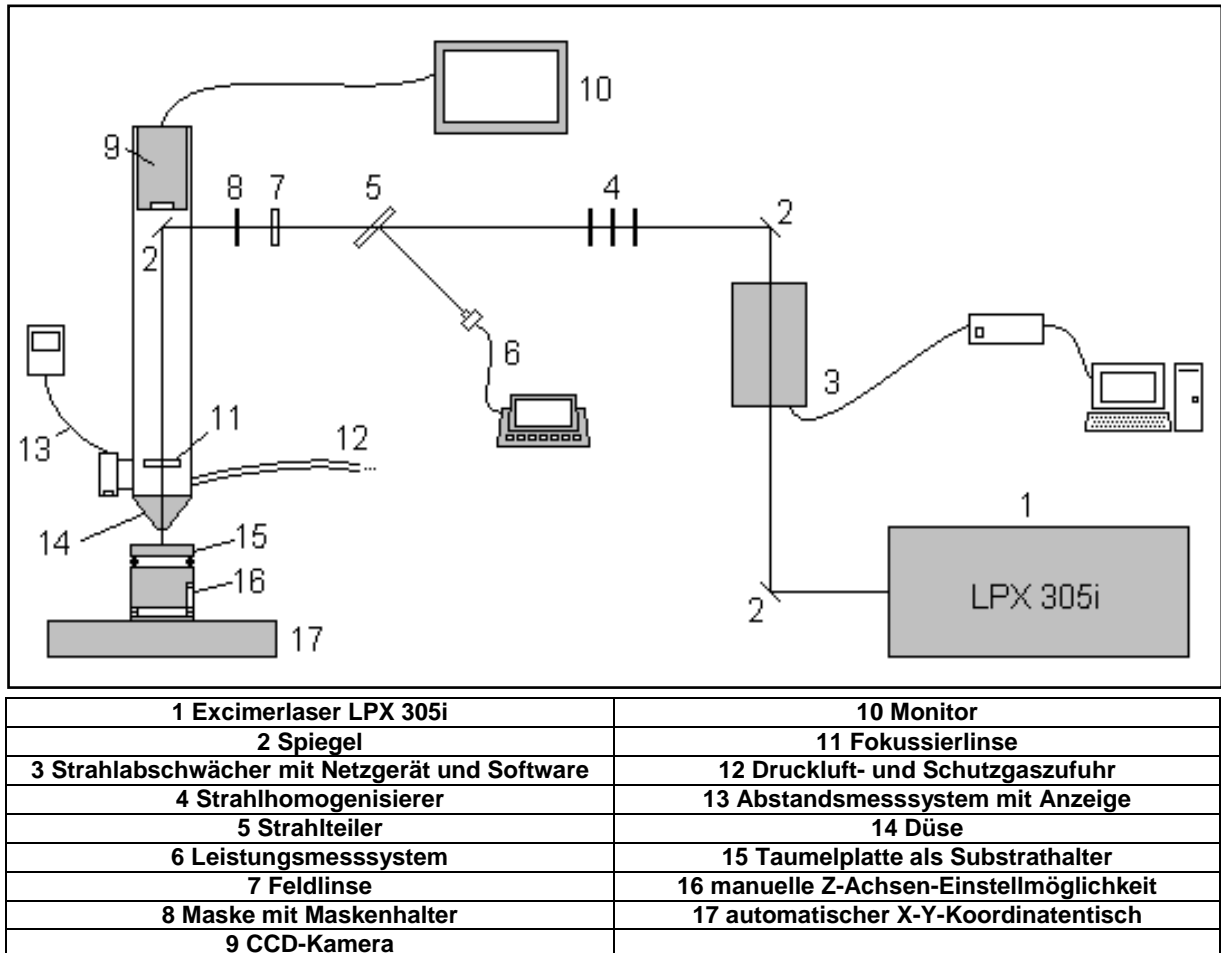


Abb. 4.1: Aufbau der verwendeten Excimerlaser-Mikrobearbeitungsanlage.

Der für die Bearbeitung benutzte Laser LPX 305i ist ein KrF-Excimerlaser der Wellenlänge 248 nm von der Firma Lambda Physics und kann mit Frequenzen von 1 – 50 Hz betrieben werden. Die maximale Pulsenergie liegt bei rund 1,0 J, die Pulsdauer τ_p hat Albert mit 23 ns bestimmt [19].

Da die Hochspannung für den Laserbetrieb nur zwischen 15 kV – 21 kV verändert werden kann und damit die Fluenzen für die Bearbeitung grob von rund 5,5 J/cm² bis 14,0 J/cm² einstellbar sind, wurde ein externer Strahlabschwächer installiert, welcher aus dielektrischen Quarzglasplatten besteht, die je nach Winkel einen bestimmten Teil der Laserstrahlung transmittieren bzw. reflektieren, ohne dabei die Eigenschaften des Strahls zu beeinflussen. Der Strahlabschwächer ermöglicht dabei für die Bearbeitung benutzbare Fluenzen bis in den Bereich von rund 0,5 J/cm² und eine feinere Einstellbarkeit der Fluenzen allgemein.

Das bei einem Excimerlaser typische inhomogene Strahlprofil wird durch einen Homogenisator in ein Profil mit homogener Intensitätsverteilung umgewandelt, um eine über den gesamten Fokus gleichmäßige Materialbearbeitung zu gewährleisten.

Durch eine in-situ-Leistungsmessung kann weiterhin die für die Versuche notwendige Fluenz während der Bearbeitung überwacht und eingestellt werden, indem man die Hochspannung am Laser und den Strahlabschwächerwinkel verändert. Eine weitere Möglichkeit der Bearbeitungsüberwachung ist durch eine CCD-Kamera mit Monitor gegeben.

Zusätzlich ist der CCD Laser-Wegmesssensor LK-G10 der Firma Keyence vorhanden, mit dem der Abstand des Materials vom Fokus bestimmt werden kann. Laut Angaben des Herstellers beträgt das Auflösungsvermögen des Sensors $0,01\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Genauigkeit von $\pm 0,03\text{ }\%$ vom Endwert. Die maximal einstellbare Abtastfrequenz liegt bei 50 kHz . Durch die Taumelplatte, die als Substrathalter dient, kann dabei das zu bearbeitende Material in der Horizontalen ausgerichtet werden, um eine möglichst gleichbleibende Fokusslage auf dieser zu gewährleisten.

Die Maske wird auf der Probenoberfläche mit einem Verhältnis von 8:1 abgebildet.

4.2 Eigenschaften der verwendeten Substratmaterialien

4.2.1 D 263 T

D 263 T ist ein Borosilikatglas der Firma Schott, das sich laut Herstellerangaben durch eine geringe Mobilität von Alkaliionen, die maßgebend für die Korrosionsanfälligkeit ist, einer hohen chemischen Beständigkeit, einer hohen Lichttransmission, leichter Schneidbarkeit und einer exzellenten Oberflächengüte (Rauigkeit $< 1\text{ nm rms}$) auszeichnet [20].

Die wichtigsten technischen Informationen im Überblick sind:

Tabelle 4: Technische Daten von D 263 T [20].

Ausdehnungskoeffizient α ($20\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$7,2 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Oberer Kühlpunkt	$557\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dielektrizitätskonstante ϵ_r	6,7 bei 1 MHz
Brechungsindex n_D	1,523
Dichte	$2,51\text{ g/cm}^3$
Abbe-Zahl	55

Nach DIN ISO 719 ist D 263 T in die hydrolytische Klasse HGB 1 eingeordnet, wodurch es zu den stabilsten gegenüber durch Feuchtigkeit hervorgerufenen Korrosionsprozesse gehört. Die Säureklasse nach DIN 12116 ist S2, wodurch es als schwach säurelöslich gilt.

Der obere Kühlpunkt gibt die Temperatur an, für die im Glas auftretende Spannungen am schnellsten abgebaut werden, ohne dass dabei eine Verformung des Materials auftritt.

Aufgrund seiner Ebenheit und der Beständigkeit gegenüber klimatischen Einflüssen wie Hitze und Feuchtigkeit besitzt D 263 T viele Anwendungen. Unter anderem wird es als Substrat für optische Beschichtungen, Displayglas für PMLCD-, AMLCD- und TFT-Anwendungen, Elektrolumineszenzanzeigen und optische Fenster eingesetzt.

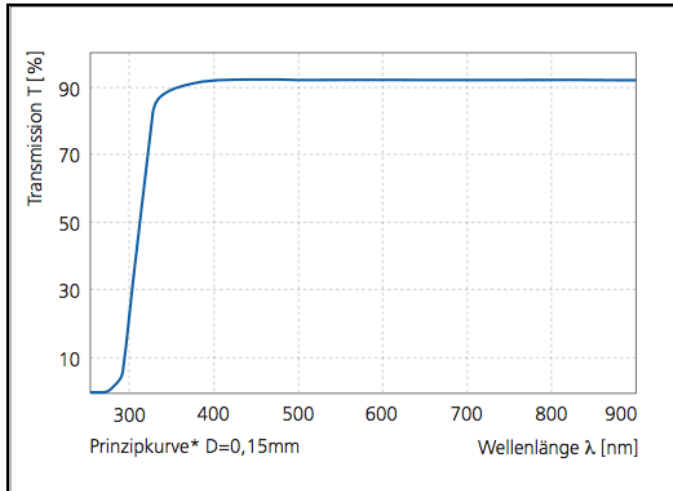


Abb. 4.2: Transmissionskurve von D 263 T bei einer Dicke von 0,15 mm [21].

4.2.2 TOPAS COC

TOPAS Cyclo-Olefin-Copolymere (COC) ist die Handelsbezeichnung der TOPAS Advanced Polymers, Inc. und besteht aus amorphen, transparenten Copolymeren auf der Basis von cyclischen und linearen Olefinen, mit denen die Eigenschaften in einem weiten Bereich variiert werden können. Zu den allgemeinen Eigenschaften gehören [22]:

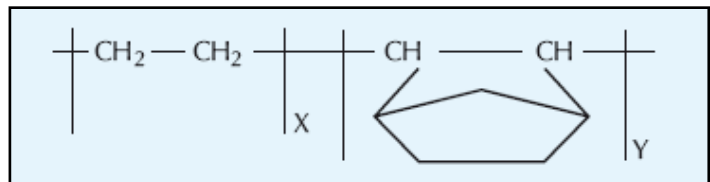


Abb. 4.3: Chemischer Aufbau von TOPAS COC [23].

- Hohe Transparenz und Reinheit
- Überragende Sperrwirkung gegen Wasser → etwa doppelte Wasserdampfsperwirkung von Polyethylen hoher Dichte (HDPE) und fünffache von Polyethylen niedriger Dichte (LDPE)
- Hohe Steifheit und Festigkeit
- Wärmeformbeständigkeit bis 170 °C
- Hervorragende Biokompatibilität
- Sehr gute Beständigkeit gegen Säuren, Laugen und polare Lösungsmittel
- Niedrige Dichte
- Sehr gute elektrische Isolationseigenschaften
- Außerordentlich geringe Wasseraufnahme
- Geringe Doppelbrechung

Durch diese Eigenschaften ergibt sich ein großes Spektrum an Einsatzmöglichkeiten für TOPAS COC. So werden sie als optische Funktionsfolien in Flachbildschirmen sowie bei Linsen, Sensoren und Lichtleitern eingesetzt. Weiterhin haben sie Anwendungsgebiete als Sichtfolien bei Pharma- und Körperpflegeprodukten und als flexible Folien für Lebensmittel-, Medizin- und Industrieverpackungen. Vorfüllbare Spritzen, Fläschchen und Ampullen für pharmazeutische Zwecke sowie diagnostische Mittel wie Mikrotiterplatten und Küvetten werden aus TOPAS COC hergestellt. Außerdem werden sie in Farbdruckern als Tonerbindemittel eingesetzt.

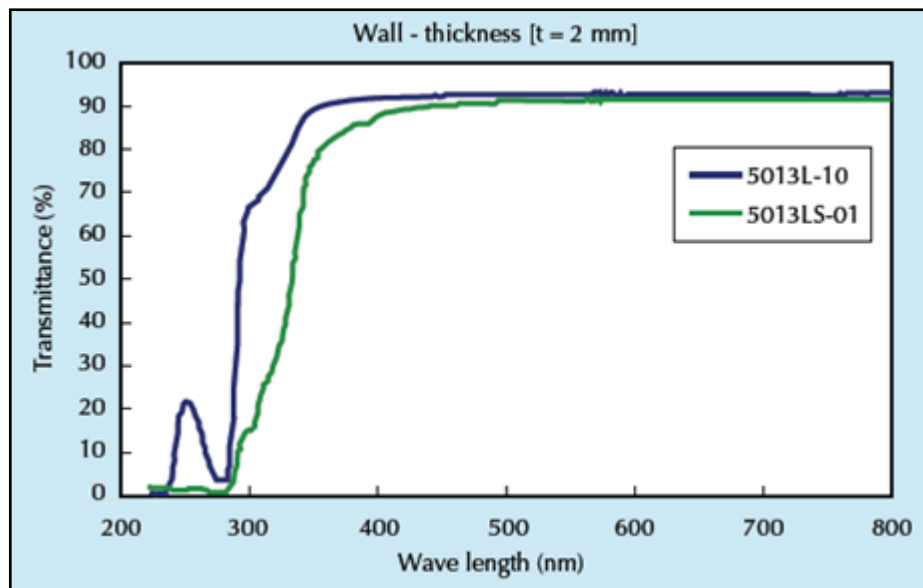


Abb. 4.4: Lichttransmissionskurve für eine 2 mm dicke Scheibe aus TOPAS 5013L-10 und 5013LS-01 [24].

Die für die Untersuchungen verwendete Probe hatte die Spezialbezeichnung 5013. Anhand der Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass für eine Wellenlänge von 248 nm bei einer 2 mm dicken Scheibe aus TOPAS 5013L-10 noch etwa 16 – 18 % der Strahlung transmittiert wird.

4.2.3 Tantal

Tantal ist ein chemisches Element der fünften Nebengruppe im Periodensystem mit der Ordnungszahl 73. Es ist ein hellgrau glänzendes Schwermetall mit einer kubisch raumzentrierten Gitterstruktur. Die wichtigsten Eigenschaften von Tantal sind:

Tabelle 5: Eigenschaften von Tantal.

Dichte	16,65 g/cm ³
Schmelzpunkt	3017 °C
Siedepunkt	5458 °C
Elektrische Leitfähigkeit	$7,61 \cdot 10^6$ A/(V · m)
Wärmeleitfähigkeit	57 W/(m · K)

Reines Tantal ist gut dehnbar, jedoch können schon kleine Mengen an Kohlenstoff und Sauerstoff das Material verspröden. Da Tantal ein unedles Metall ist, reagiert es bei Temperaturen ab 300 °C mit den meisten Nichtmetallen wie Sauerstoff, Kohlenstoff oder Halogenen. Bei Raumtemperatur ist Tantal durch eine dünne Passivierungsschicht von Tantal(V)-oxid geschützt, die das Metall sehr säurebeständig macht, wodurch selbst Königswasser es nicht auflösen kann. Dies schaffen nur Flusssäure, Oleum und Salzsämelzen.

Tantal wird unterhalb einer Sprungtemperatur von 4,3 K zu einem Supraleiter.

Verwendung findet Tantal aufgrund seiner selbst bei sehr dünnen Folien stabilen und sicher isolierenden Tantal(V)-oxidschicht überwiegend für sehr kleine Kondensatoren, da sie eine sehr hohe Permittivität ϵ besitzt und selbst sehr dünn ist, wodurch hohe Kapazitäten erreicht werden können ($C \sim 1/d$, $C \sim \epsilon$). Durch die Passivierung reagiert Tantal nicht mit Körpergewebe oder -flüssigkeiten. Weiterhin ist Tantal nicht giftig. Daher werden zum Beispiel Prothesen, Knochennägel und Kieferschrauben aus Tantal gefertigt. Als Zusatzwerkstoff in Legierungen ergeben sich für Tantal weitere Anwendungsmöglichkeiten.

4.2.4 Werkzeugstahl 1.2365

Der Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365 ist ein hochlegierter Warmarbeitsstahl, der durch seine hohe Anlassbeständigkeit sehr gut für das Vergüten geeignet ist.

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung des Werkzeugstahls 1.2365 in Gewichts-% nach [25].

Element	C	Cr	Mo	Si	Mn	V	Fe
Anteil in %	0,32	2,95	2,80	0,25	0,30	0,55	Rest

Anwendungen findet der Werkzeugstahl als Druckgießformen für Schwermetalle, Werkzeuge zum Warmschmieden wie Gesenke für Schmiedepressen, Gesenkeinsätze und Formteilpressgesenke, Werkzeuge zum Strangpressen von Schwer- und Leichtmetallen wie Innen- und Zwischenbüchsen, Pressdorne, Pressscheiben, Pressmatrizen und Matrizenhalter.

Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften des Werkzeugstahls 1.2365 nach [25].

Elastizitätsmodul E in kN/mm ² (bei 20 °C)	215
Dichte ρ in kg/dm ³ (spezifisches Gewicht)	7,85
Wärme-Ausdehnungskoeffizient α in 10 ⁻⁶ /°C (bei 20 °C – 300 °C)	12,9
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m · K) (bei 100 °C)	34,4
Spezifischer elektrischer Widerstand ρ in $\mu\Omega\text{cm}$	36

4.2.5 Edelstahl 1.4301

Der Edelstahl 1.4301 ist ein Cr-Ni-Stahl, welcher durch seine Rost- und Säurebeständigkeit, der guten Kaltverformbarkeit und Tiefziehfähigkeit sowie seiner guten Schweißbarkeit eine sehr breite Verwendung findet. Durch seinen geringen Kohlenstoffgehalt von unter 0,07 % bleibt der Stahl auch ohne nachträgliche Wärmebehandlung nach dem Schweißen interkristallin beständig.

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung des Edelstahls 1.4301 in Gewichts-% [26].

Element	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N	Fe
Anteil in %	≤ 0,07	17,0 – 19,5	8,0 – 10,5	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,015	≤ 0,110	Rest

Anwendungen findet der Stahl vor allem in Geräten der Nahrungsmittelindustrie, im chemischen Apparatebau, der Uhren-, Messer-, Pharma- und Kosmetikindustrie, der Medizinaltechnik, im Fahrzeugbau, für Haushaltsgegenstände und -geräte und für Sanitäranlagen.

Tabelle 9: Physikalische Eigenschaften des Edelstahls 1.4301 nach [26].

Elastizitätsmodul E in kN/mm ² (bei 20 °C)	200
Poisson-Konstante	0,3
Dichte ρ in kg/dm ³ (spezifisches Gewicht)	7,9
Schmelzbereich in °C	1420 – 1470
Wärme-Ausdehnungskoeffizient α in 10 ⁻⁶ /°C (bei 20 °C – 300 °C)	16
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m · K) (bei 20 °C)	15
Spezifischer elektrischer Widerstand ρ in $\mu\Omega\text{cm}$	73
Spezifische elektrische Leitfähigkeit σ in MS/m	1,4
Spezifische Wärmekapazität c in J/(kg · K) (bei 20 °C)	500

5 Abtragsuntersuchungen

Um die Bearbeitungsmöglichkeiten verschiedener Materialien mittels Excimerlaser ermitteln zu können, sind grundsätzliche Abtragsuntersuchungen notwendig. Diese sollen aufgrund verschiedener Parameter Aussagen über die Abtragsrate, der Schwellfluenz, Aufwürfe, Bildung von Debris, Rauheit, Bodenwölbung und der Kantensteilheit zulassen und damit Aufschlüsse über die Bearbeitbarkeit der Materialien geben.

Die Rauheit und Tiefe der erzeugten Abtragsflächen wurde mit dem Oberflächenprofilometer Sloan DEKTAK 3030 ausgewertet, das mit Hilfe einer Nadel mit Diamantspitze, die mit einer definierten Anpresskraft von 10 mN über die Probenoberfläche geführt wird, die Oberflächentopographie der Probe erfasst. Diese wird über Vertikalbewegungen der Nadel übertragen, wodurch analoge elektrische Signale erzeugt werden, die ein Analog-Digital-Wandler verarbeitet und damit eine graphische Darstellung möglich macht. Die Y-Achse für die in der Diplomarbeit verwendeten mittels Sloan DEKTAK 3030 vermessenen Profile ist in Ångstrom angegeben. Der Öffnungswinkel der Messspitze beträgt 60°, der Durchmesser der Spitze ist mit 10 µm angegeben.

Als weiteres Messmittel wurde das Laserscanningmikroskop LSM 5 Pascal von Carl Zeiss verwendet. Bei diesem Verfahren wird zur Bestimmung von Oberflächentopographien die Probenoberfläche mit Hilfe eines Lasers mehrfach gerastert, wobei schrittweise die optische Achse verfahren wird. Dabei werden die Rückreflexe, die bei Stellen im Fokusbereich des Lasers am stärksten sind, detektiert. Durch die Auswertung der Rückreflexe wird schließlich die Oberflächentopographie der Probe erstellt.

Die für die zur Berechnung der Schwellfluenz H_S – die Fluenz, bei der ein Abtrag erstmalig auftritt – und des Abtragskoeffizienten benutzte Regressionsgleichung leitet sich aus dem Bouguer-Lambertschen Gesetz her, was aussagt, dass die Intensität der Strahlung in einem homogenen Medium exponentiell abgeschwächt wird:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (\text{Gl. 5}).$$

$I(z)$ entspricht hierbei der Intensität in der Materialtiefe z , I_0 der in das Material eingekoppelten Intensität und α dem Absorptionskoeffizienten.

Die Intensität I ergibt sich aus dem Produkt der Fluenz H mit der Pulswiederholfrequenz f_p . Da die Pulswiederholfrequenz f_p während der Bearbeitung als eingestellter Laserparameter konstant bleibt, ist die Intensität I direkt proportional zur Fluenz H , wodurch das Bouguer-Lambertsche Gesetz ebenso für die Fluenz H genutzt werden kann:

$$H(z) = H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (\text{Gl. 6}).$$

Die Schwellfluenz H_S ergibt sich nun aus der Annahme, dass das Material bis zu der Tiefe, für die die Schwellfluenz bei jedem Puls erreicht wird, ablatiert wird:

$$H_S = H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (\text{Gl. 7}).$$

z entspricht hierbei der ermittelten Abtragstiefe pro Puls.

Stellt man diese Formel nach z um, erhält man die für eine benutzte Fluenz H_0 zu erwartende Abtragstiefe pro Puls, die der Abtragsrate entspricht:

$$z = \frac{\ln \frac{H_0}{H_S}}{\alpha} \quad (\text{Gl. 8}).$$

Die ermittelten Abtragsraten der zugehörigen Fluenzen können einer Regression mit Hilfe der obigen Gleichung unterzogen werden, wodurch man die Schwellfluenz und den Absorptionskoeffizienten bestimmen kann, die für eine benutzte Wellenlänge Materialkonstanten darstellen.

5.1 TOPAS 5013

Bei TOPAS 5013 wurden zwei verschieden große quadratische Masken für die Abtragsuntersuchungen eingesetzt, welche die Abmessungen 5 mm x 5 mm und 1 mm x 1 mm besitzen. Damit beträgt die Abbildung auf der Probenoberfläche 0,625 mm x 0,625 mm und 0,125 mm x 0,125 mm.

Die Testfelder wurden im Burst-Modus erzeugt, was bedeutet, dass die Probe während der Bearbeitung nicht verfahren wird. Das Testfeld wurde wie folgt gewählt:

	1 Puls	10 P.	50 P.	100 P.	200 P.
50 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 5.1: Parameterfeld für die Abtragsuntersuchungen bei TOPAS 5013.

Bei diesen Testfeldern wurden für beide Masken die Fluenzen 0,5 J/cm², 1,0 J/cm², 1,5 J/cm², 2,0 J/cm², 2,5 J/cm², 3,0 J/cm² und 4,0 J/cm² verwendet.

Für eine Fluenz von $0,5 \text{ J/cm}^2$ konnte dabei noch keine sichtbare Bearbeitung des Materials erzielt werden. Dies war erst bei einer Fluenz von $1,0 \text{ J/cm}^2$ gegeben. Dabei wurde jedoch noch kein Abtrag erreicht, sondern nur das Material aufgeschmolzen beziehungsweise durch ein Aufbrechen von Bindungen das Material modifiziert. Für höhere Fluenzen bis zu einer bestimmten Pulszahl ebenso. Mit zunehmender Fluenz verringert sich dabei die Anzahl der Pulse, ab denen ein Abtrag stattfindet. Abbildung 5.2 zeigt ein Beispiel solch einer Struktur:

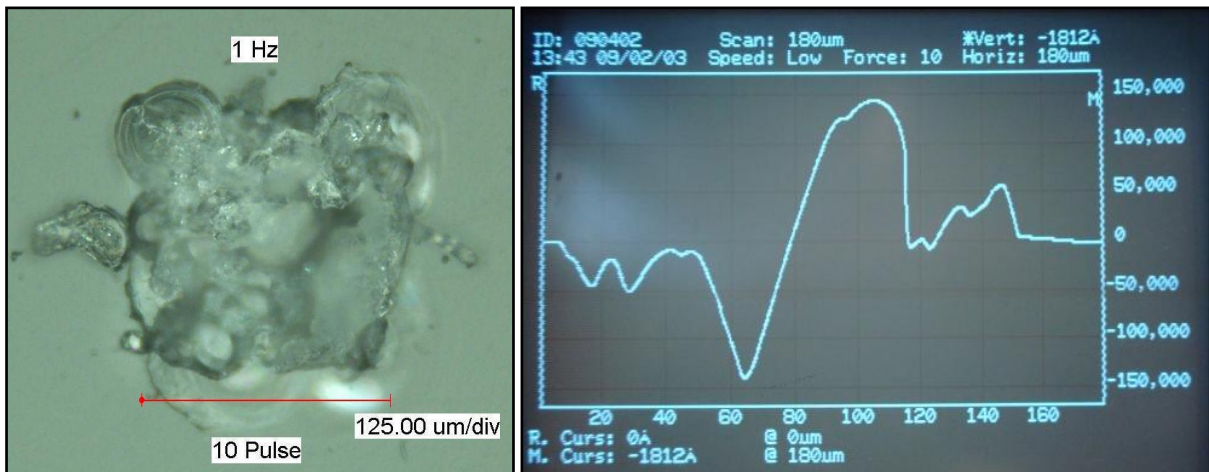


Abb. 5.2: Abtrag für $1,5 \text{ J/cm}^2$, 1 Hz, 10 Pulse (Maske $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$); links: Digitalmikroskopische Aufnahme, 500-fache Vergrößerung, rechts: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.

Für die Bearbeitung mit der Maske der Abmessungen $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ war ein großer Einfluss der Pulswiederholfrequenz zu erkennen. Hierbei kam es bei höheren Pulswiederholfrequenzen zu einer Aufschmelzung des Materials an den Strukturrändern:

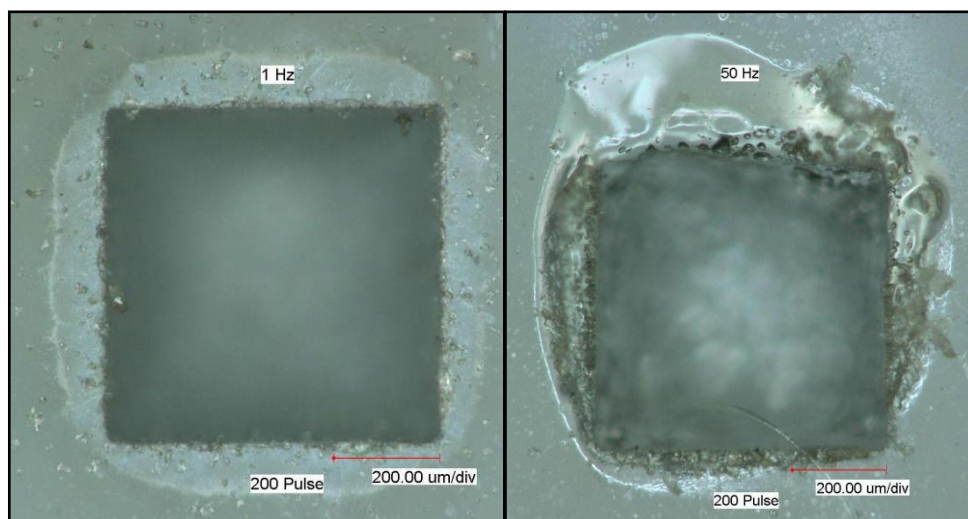


Abb. 5.3: Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses bei $4,0 \text{ J/cm}^2$ und 200 Pulsen bei einer Pulswiederholfrequenz von 1 Hz (links) und 50 Hz (rechts), (Maske $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 200-fache Vergrößerung).

Bei kleineren Fluenzen tritt der Effekt der Aufschmelzung an den Strukturrändern bei hohen Pulswiederholfrquenzen ebenfalls auf, aufgrund des geringeren Energieeintrags in das Material jedoch nicht so stark:

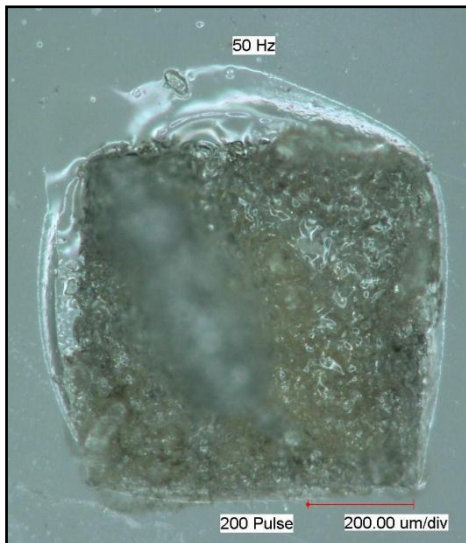


Abb. 5.4: Digitalmikroskopische Aufnahme einer Struktur für 1,5 J/cm², 50 Hz, 200 Pulse (Maske 5 mm x 5 mm, 200-fache Vergrößerung).

Für die Maske der Abmessungen 1 mm x 1 mm ist der Einfluss der Pulswiederholfrquenz nicht so stark ausgeprägt, jedoch sind starke Schmelzspritzer zu erkennen.

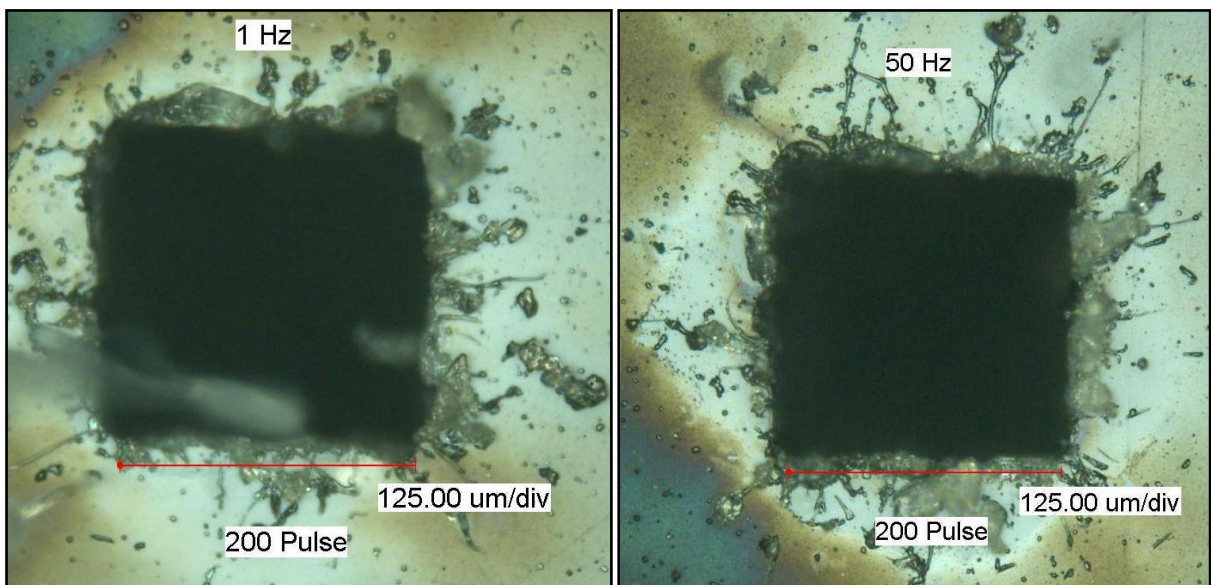


Abb. 5.5: Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses bei 4,0 J/cm² und 200 Pulsen bei einer Pulswiederholfrquenz von 1 Hz (links) und 50 Hz (rechts) (Maske 1 mm x 1 mm, 500-fache Vergrößerung).

Für höhere Fluenzen nahm die Spritzerbildung bei der Maske mit den Abmaßen 1 mm x 1 mm wieder aber, die Abbildungsgenauigkeit der Maske verschlechterte sich dafür erheblich:

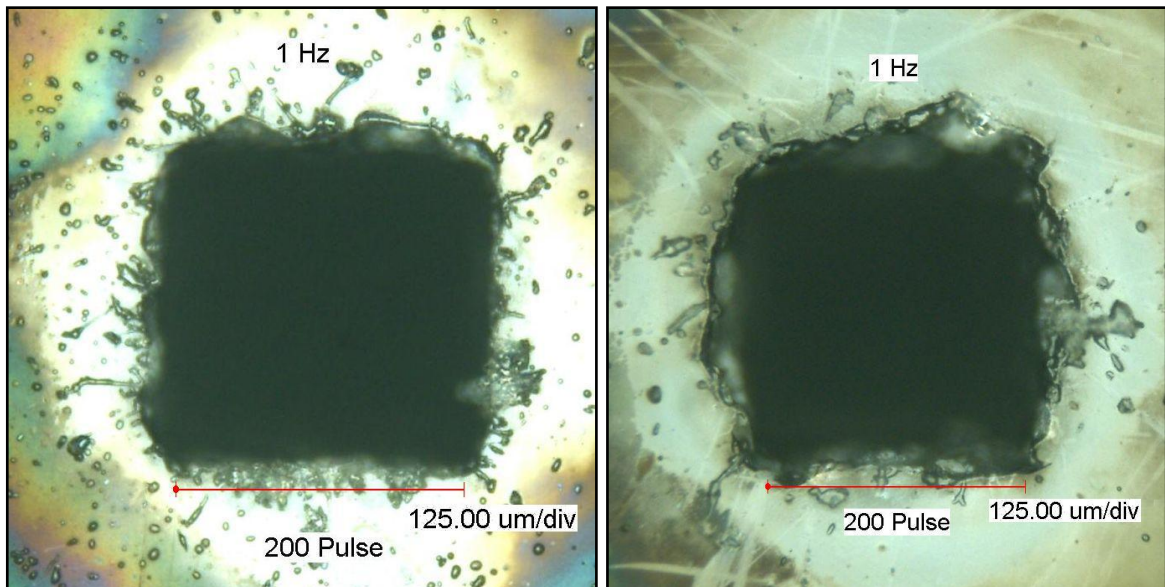


Abb. 5.6: Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses für 1 Hz und 200 Pulse bei 8,0 J/cm² (links) und 12,0 J/cm² (rechts) (Maske 1 mm x 1 mm, 500-fache Vergrößerung).

Ein definierter Abtrag war für TOPAS 5013 nicht zu erreichen. Bei der Bearbeitung bildeten sich trichterförmige Strukturen bei Abtragstiefen von rund 40 µm – 50 µm aus. Als Beispiele sollen die in Abbildung 5.7 dargestellten Oberflächenlinienprofile dienen:

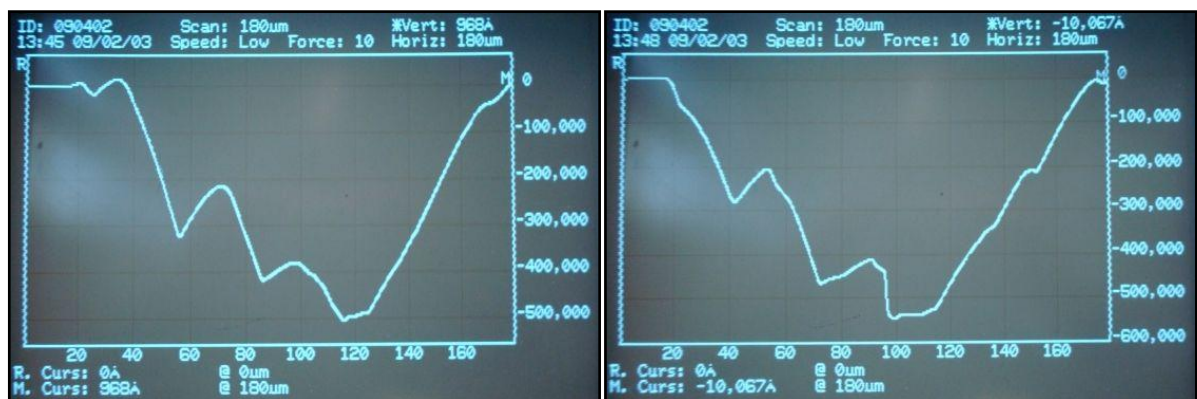


Abb. 5.7: Mittels Sloan DEKTAK 3030 vermessene Oberflächenlinienprofile (links: 1,5 J/cm², 1 Hz, 200 Pulse; rechts: 12,0 J/cm², 1 Hz, 10 Pulse).

Aufgrund der schlechten Bearbeitungsergebnisse wurde eine Abtragsratenbestimmung nicht durchgeführt. Eine definierte und saubere Strukturierung von TOPAS 5013 ist mittels KrF-Excimerlaser nicht möglich. Hierfür sollte der Fluorlaser verwendet werden. Aufgrund seiner niedrigeren Wellenlänge von 157 nm und der daraus resultierenden wesentlich besseren Absorption konnte Bertram deutlich bessere Ergebnisse erzielen:

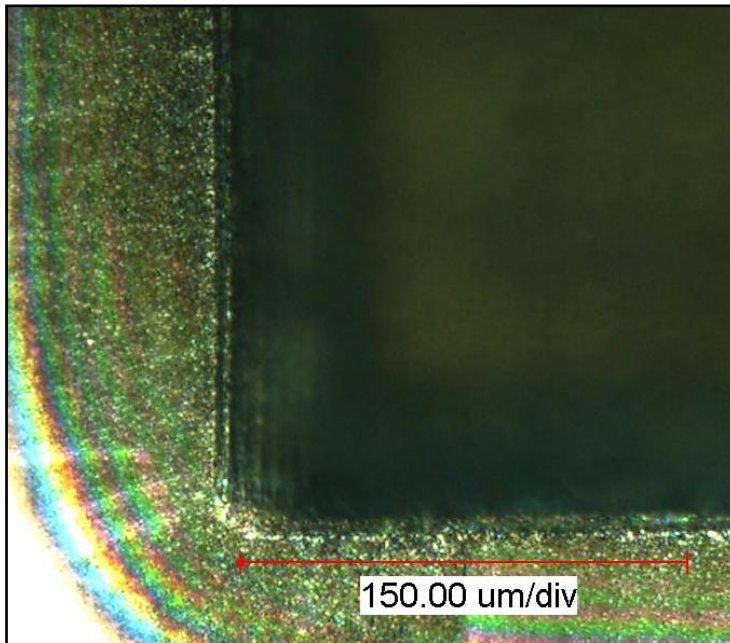


Abb. 5.8: Flächenabtrag von TOPAS 5013 mittels Fluorlaser (Maskenabbildung 50 μm x 50 μm , 0,5 J/cm², 200 Hz, Pulsüberlapp 90 %, 2 Überfahrten in X- und Y-Richtung) [27].

5.2 D 263 T

Für D 263 T wurden ebenfalls die beiden Rechteckmasken mit den Abmaßen 5 mm x 5 mm und 1 mm x 1 mm verwendet. Für das Versuchsfeld der Maske mit den Abmaßen von 5 mm x 5 mm wurden folgende Parameter gewählt:

	1 Puls	10 P.	50 P.	100 P.	200 P.
50 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 5.9: Testfeld für die Abtragsuntersuchungen bei D 263 T mit der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm.

Für diese Testfelder wurden die Fluenzen 1,0 J/cm², 2,0 J/cm², 3,0 J/cm², 4,0 J/cm² und 5,0 J/cm² verwendet.

Eine vernünftige Auswertung der Ergebnisse konnte hierbei nicht erfolgen, da sich Spannungsrisse in den Strukturböden bildeten, welche zu Ausplatzungen führten. Die Spannungsrisse traten dabei unabhängig von Fluenz und Pulswiederholfrequenz auf, sondern waren nur von der Pulsanzahl abhängig. Für die Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm traten die Risse ab 50 Pulsen auf. Durch mechanische Einwirkung erhöhte sich die Anzahl der Risse in den Strukturböden drastisch. Abbildung 5.10 zeigt vergleichbare Strukturen, wie sie vor und nach mechanischer Einwirkung aussehen:

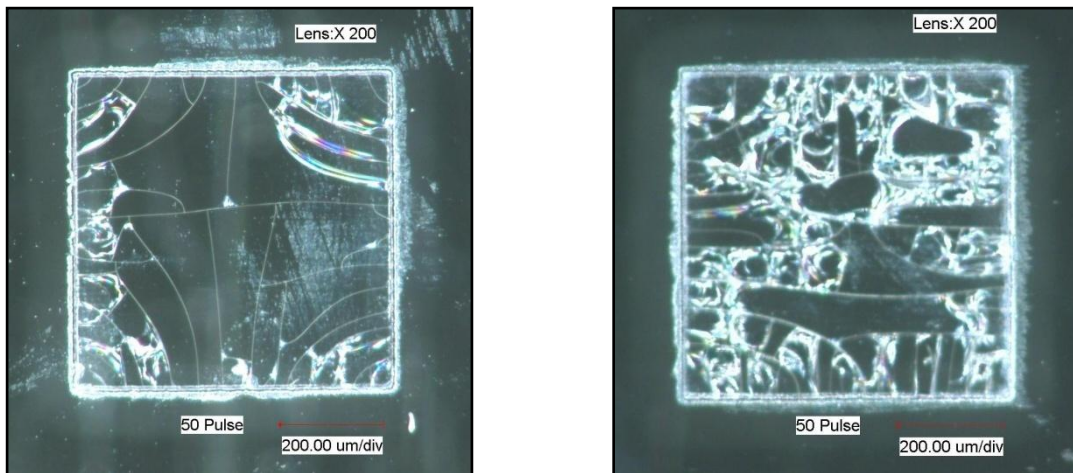


Abb. 5.10: Vergleichbare Strukturböden vor und nach mechanischer Einwirkung
(links: 5,0 J/cm², 50 Hz, 50 Pulse; rechts: 4,0 J/cm², 1 Hz, 50 Pulse)

Bei der Betrachtung direkt nach der Bearbeitung konnten die hellen Flächen an den gebildeten Mikrorissen im linken Bild der Abbildung 5.10 noch nicht gesehen werden. Diese entstanden jedoch nicht durch die mechanische Einwirkung, sondern sind im Laufe der Zeit von allein entstanden. Weitergehende Untersuchungen dazu wurden mit der Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm unternommen, welche noch folgen.

Wenn man die hellen Flächen näher betrachtet, stellt man fest, dass es sich hierbei nicht vorrangig um ausgeplatztes Material handelt, sondern um kleine Schichten, die sich vom Grundmaterial abheben und durch Interferenzerscheinungen Newtonsche Ringe erzeugen:

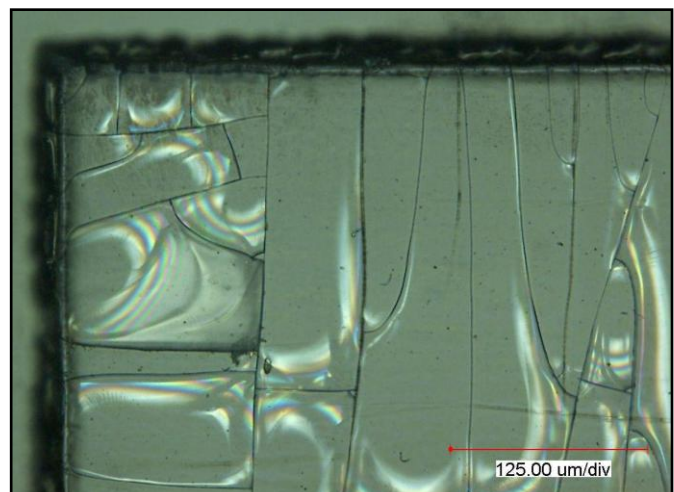


Abb. 5.11:
Interferenzerscheinungen durch das
Abheben dünner Schichten von der
Grundplatte.

Weitergehend wurde für die Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm durch den Gebrauch noch höherer Fluenzen untersucht, ob die Bildung der Mikrorisse tatsächlich nur von der Pulszahl abhängt. Eine Unterteilung der Pulszahlen hierbei in 10er-Schritten bis 50 Pulse sollte dabei eine genauere Auskunft darüber geben, ab wann sich Risse bilden. Als Fluenzen wurden 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm² gewählt. Die Unabhängigkeit der Rissbildung von der Fluenz konnte dabei für beide Fluenzen bestätigt werden, Mikrorisse entstanden schon ab 20 Pulsen:

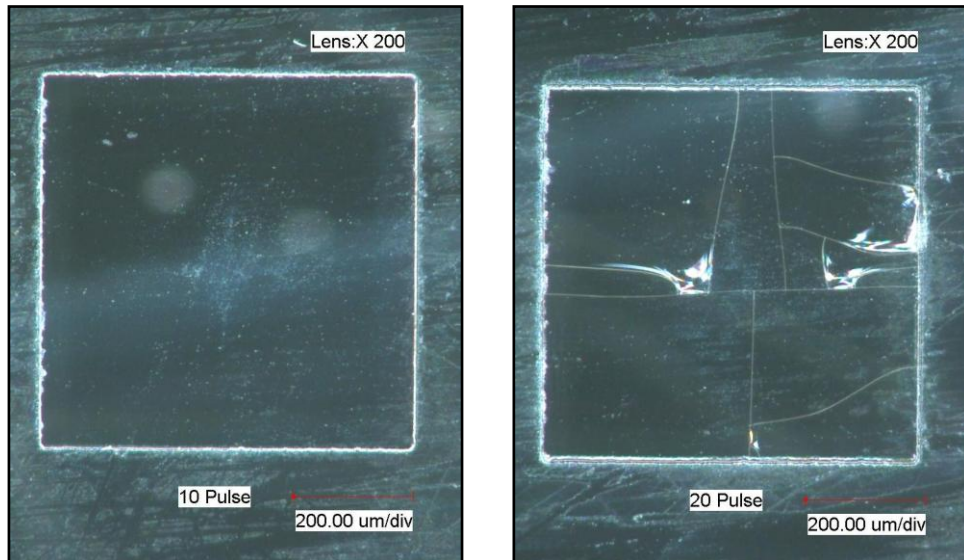


Abb. 5.12: Erste Rissbildungen für D 263 T ab 20 Pulsen bei der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm (Fluenz: 6,0 J/cm²).

Wie man erkennen kann, ist die Abbildung der Maske für D 263 T sehr gut. Weiterhin ist auch ein sehr guter definierter Tiefenabtrag gegeben:

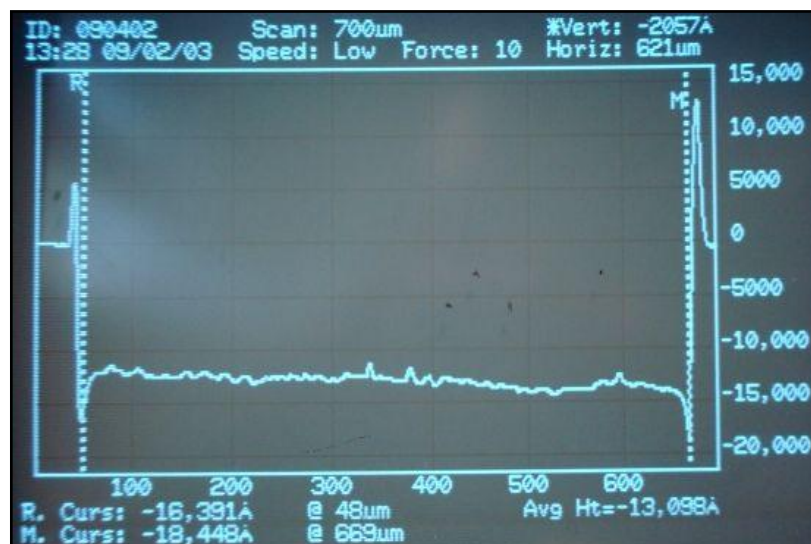


Abb. 5.13: Oberflächenlinienprofil der Strukturierung von D 263 T (5 mm x 5 mm-Maske, 5,0 J/cm², 10 Pulse, 1 Hz), gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.

Die in Abbildung 5.13 dargestellte Strukturierung besitzt eine Rauigkeit von nur 32 nm. Erkennbar sind neben einem kleinen Aufwurf an den Strukturrändern auch eine Vertiefung an den Rändern der strukturierten Fläche, die wahrscheinlich durch Reflexionen an den Strukturwänden zustande kommen, welche hierbei zu einem vermehrten Abtrag in den Randgebieten führen.

Weiterhin kam es bei den Versuchen mit der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm zu Abtragsphänomenen bei den Versuchen mit der Fluenz 2,0 J/cm² und einigen Versuchen mit Einzelpuls. So kam es für alle Versuche mit 2,0 J/cm² zu folgenden Erscheinungen:

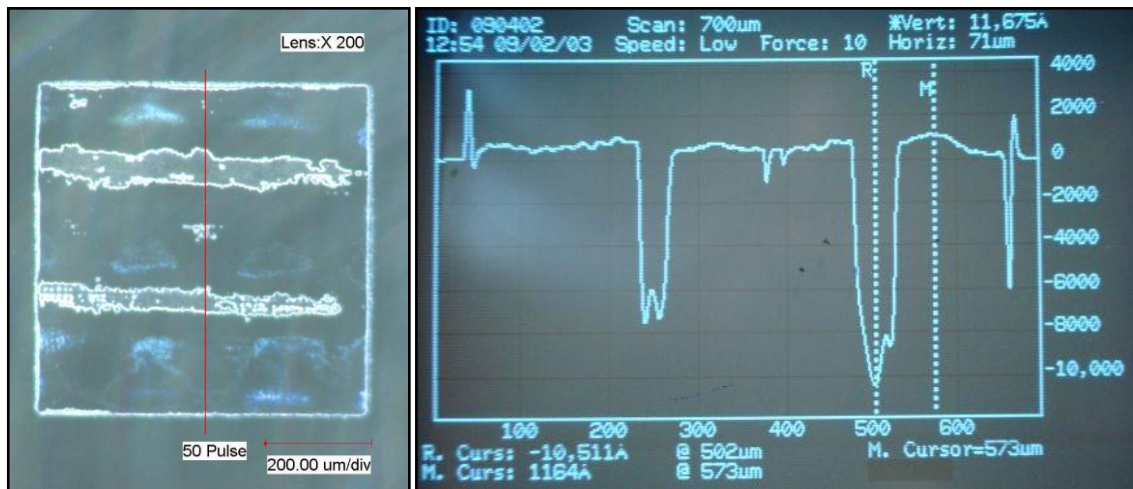


Abb. 5.14: Strukturierung von D 263 T (2,0 J/cm², 25 Hz, 50 Pulse, Maske 5 mm x 5 mm); links: digitalmikroskopische Aufnahme mit Verfahren der Prüfnadel, rechts: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.

Die in Abbildung 5.14 gezeigte Struktur ist die einzige mit 50 Pulsen, welche keine Risse besaß. Für die Pulswiederhol frequenzen 1 Hz und 50 Hz kamen Mikrorisse zustande. Eine Erklärung für das Auftreten dieser Abtragsstruktur konnte bisher nicht gefunden werden. Ein Erklärungsansatz könnte sein, dass sich die Fluenz von 2,0 J/cm² nahe der Schwellfluenz bewegt. Auftretende Inhomogenitäten des Laserstrahls könnten hierbei zu einem örtlichen Überschreiten der Schwellfluenz führen und einen Abtrag hervorrufen.

Für einzelne Pulse höherer Fluenzen kam es außerdem zu folgenden Ausbildungen:

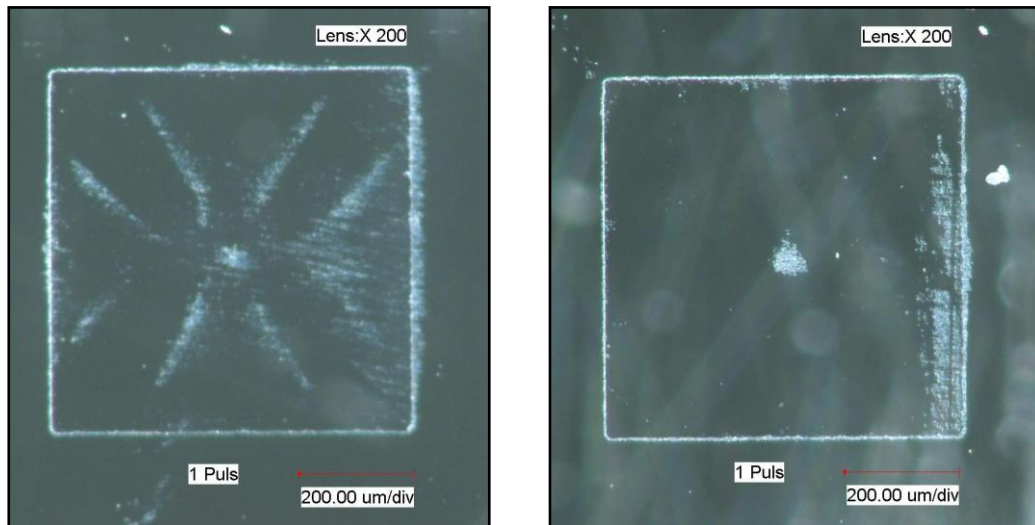


Abb. 5.15: Abtragsphänome bei D 263 T für einzelne Pulse (Maske 5 mm x 5 mm;
links: 4,0 J/cm²; rechts: 5,0 J/cm²)

Bei dem in Abbildung 5.15 rechts zu sehenden Punkt in der Mitte der Abtragsstruktur handelt es sich nicht um Debris, das sich mittels Ethanol recht leicht entfernen ließ. Bei den entstandenen Strukturen handelt es sich aber dennoch um Aufwürfe, wie sich mittels Oberflächenprofilometer bestätigen ließ:

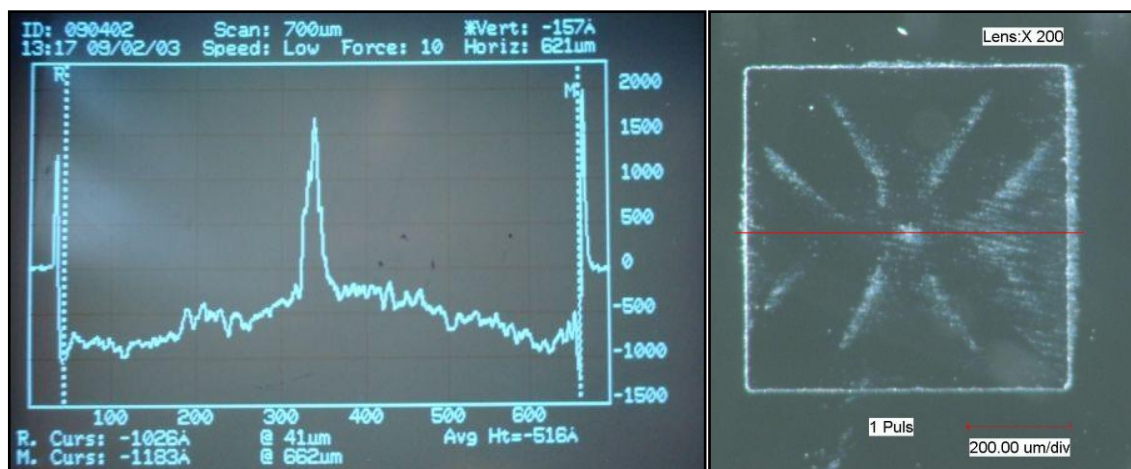


Abb. 5.16: links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030;
rechts: Verfahrenweg der Prüfnadel (Maske 5 mm x 5 mm, 4,0 J/cm², 1 Puls)

Ein Zustandekommen der Ausbildungen konnte zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht geklärt werden.

Bei der Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm haben sich ebenfalls Mikrorisse gebildet, denen nach Bekanntwerden des Auftretens für die 5 mm x 5 mm-Maske nun mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. So wurde hierfür folgende Teststruktur verwendet, welche mit den Fluenzen 2,0 J/cm², 2,5 J/cm², 3,0 J/cm², 4,0 J/cm² und 5,0 J/cm² bearbeitet wurde:

	1 Puls	10 P.	30 P.	50 P.	70 P.
50 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 5.17: Testfeld für die Abtragsuntersuchungen bei D 263 T mit der Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm.

Für eine Fluenz von 2,0 J/cm² wurde kein Abtrag festgestellt. Es erfolgte jedoch eine Modifizierung der Oberfläche:

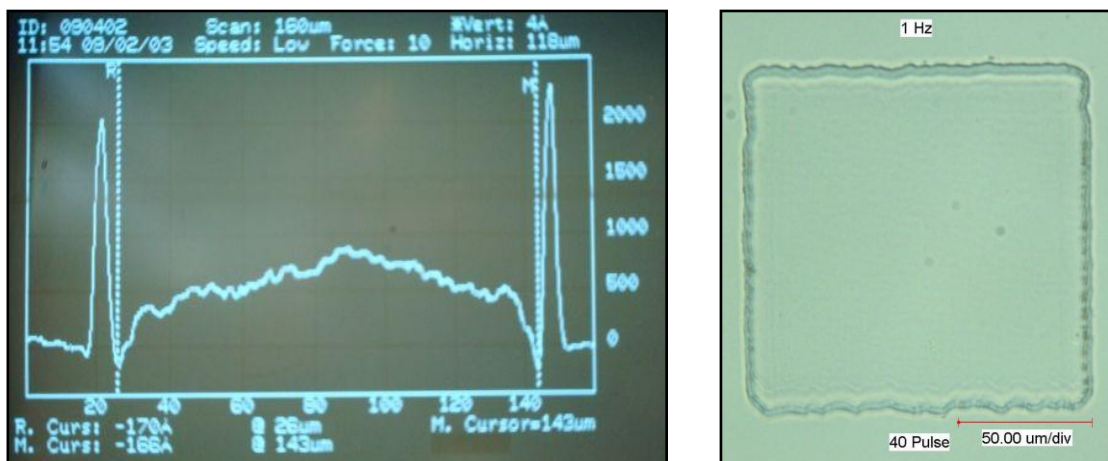


Abb. 5.18: Strukturierung von D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 2,0 J/cm², 1 Hz, 40 Pulse);
links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030,
rechts: digitalmikroskopische Aufnahme.

Durch die kleineren Abstände der Pulsanzahlen konnte für die Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm neben der Abhängigkeit der Rissbildung von der Pulszahl auch deren Abhängigkeit von der Fluenz bewiesen werden. Eine Abhängigkeit von der Pulswiederholfrequenz ist jedoch auch hier nicht gegeben. Für eine Fluenz von 2,5 J/cm² traten auch bei 70 Pulsen noch keine Mikrorisse auf, wodurch hier noch Versuche mit 80 und 90 Pulsen durchgeführt wurden.

Folgende Tabelle zeigt das Auftreten von Mikrorissen für die benutzten Parameter auf:

Tabelle 10: Auftreten von Mikrorissen bei den Strukturen für die Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm zwei Tage nach der Bearbeitung.

Repetitionsrate Fluenz	1 Hz	25 Hz	50 Hz
2,0 J/cm ²	kein Abtrag		
2,5 J/cm ²	keine Rissbildung	ab 80 P.	ab 80 P.
3,0 J/cm ²	ab 70 P.	ab 50 P.	ab 70 P.
4,0 J/cm ²	ab 50 P.	ab 50 P.	ab 50 P.
5,0 J/cm ²	ab 30 P.	ab 30 P.	ab 30 P.

Die Risse traten dabei nicht alle direkt nach der Bearbeitung auf, sondern teilweise erst später. Daher wurde die Probe nach zwei Tagen ein zweites Mal untersucht. Die Abbildungen 5.19 – 5.21 zeigen Beispiele für die Strukturböden direkt nach der Bearbeitung und zwei Tage später:

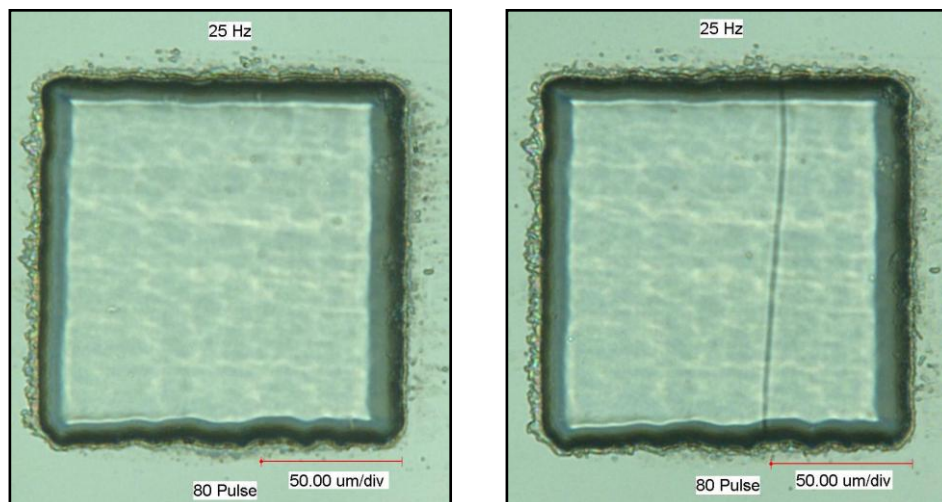


Abb. 5.19: Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 2,5 J/cm², 25 Hz, 80 Pulse); links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.

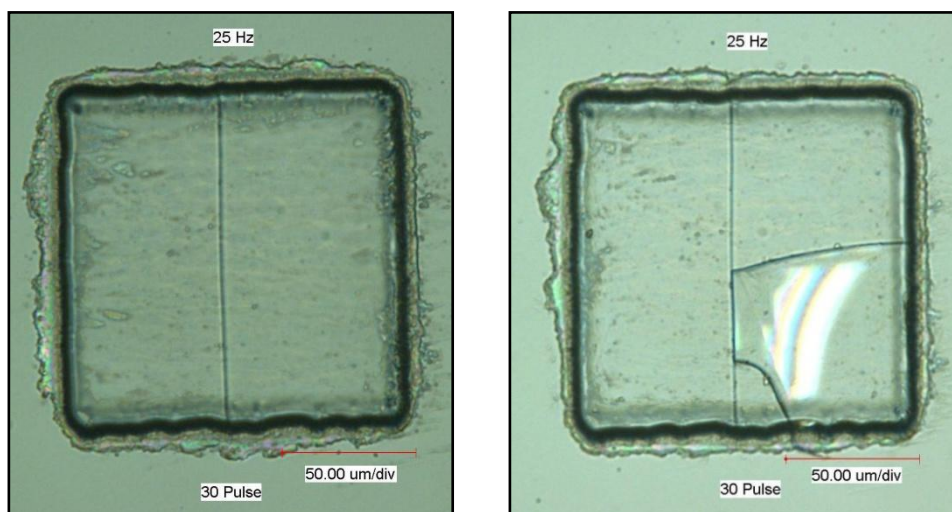


Abb. 5.20: Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 5,0 J/cm², 25 Hz, 30 Pulse); links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.

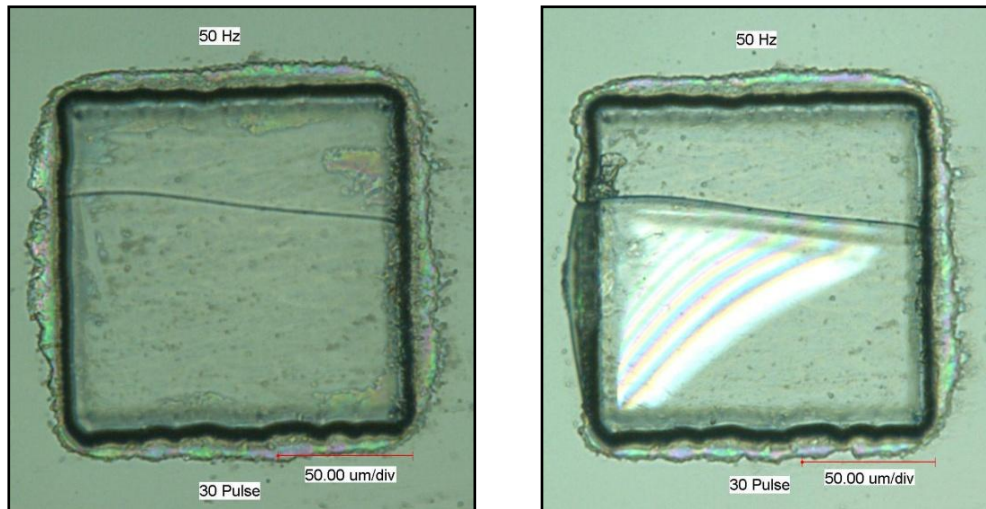


Abb. 5.21: Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 5,0 J/cm² 50 Hz, 30 Pulse);
links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.

Vor allem die Abhebungen von Teilen des Strukturbodens wirken sich sehr schlecht auf das Bearbeitungsergebnis aus, wie Abbildung 5.22 belegt:

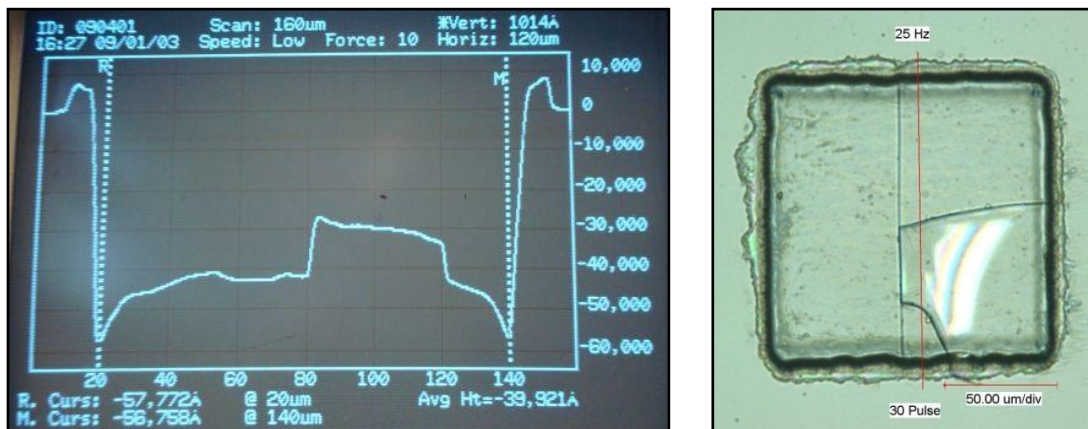


Abb. 5.22: links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030;
rechts: Verfahrensweg der Prüfnadel
(D 263 T, 1 mm x 1 mm-Maske, 5,0 J/cm², 25 Hz, 30 Pulse).

Die Vertiefungen an den Rändern nehmen aufgrund der kleineren Fläche bei der Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm einen größeren Anteil an der Gesamtstruktur ein, was einen größeren Einfluss auf die Ebenheit des Strukturbodens zur Folge hat.

Eine Abhängigkeit der Entstehung von Mikrorissen von der Größe der bearbeiteten Fläche konnte anhand der benutzten Parameter der beiden Masken nicht überprüft werden. Die Bearbeitungsergebnisse für die Fluenzen 2,5 J/cm² und 3,0 J/cm² lassen darauf schließen, dass bei der kleineren Maske im Gegensatz zur größeren Maske bis auf eine Ausnahme eine Rissbildung erst bei über 50 Pulsen auftrat. Für die nicht geschädigten Versuche der großen Maske konnte beim Vergleich zur kleineren Maske eine Abhängigkeit der Abtragstiefe von der Maskengröße nicht festgestellt werden.

Die Pulswiederholfrequenz war für die Abtragstiefen der Strukturen nicht von Bedeutung. Daher stehen die folgenden zwei Diagramme für den Bereich von 1 Hz bis 50 Hz.

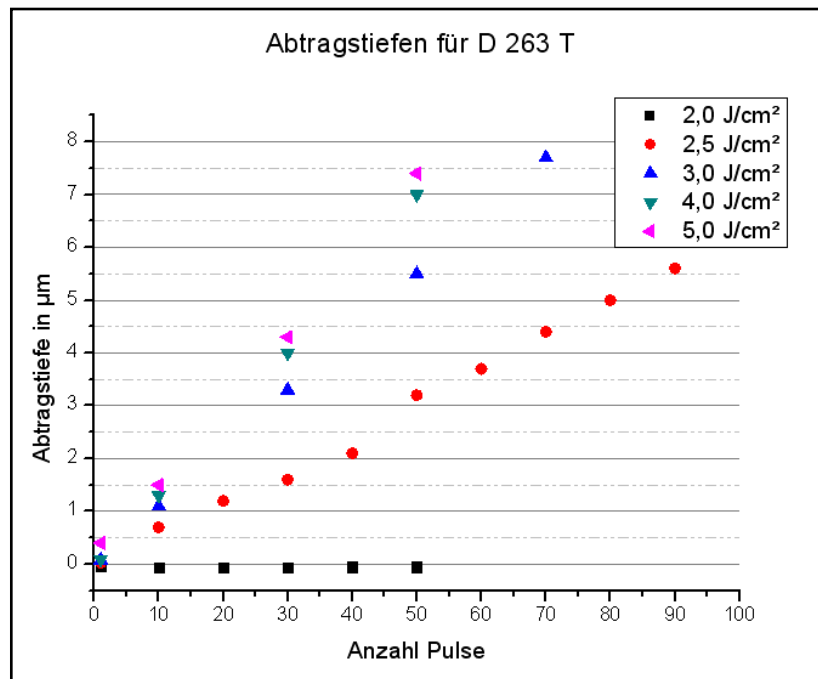


Abb. 5.23: Abtragstiefen für D 263 T bei Pulswiederholfrequenzen von 1 Hz bis 50 Hz (Maske 1 mm x 1 mm).

Für die verwendeten Pulszahlen ist ein lineares Abtragsverhalten zu erkennen. Ab einer Fluenz von 4,0 J/cm² sinkt die fluenzabhängige Zunahme der Abtragstiefe deutlich.

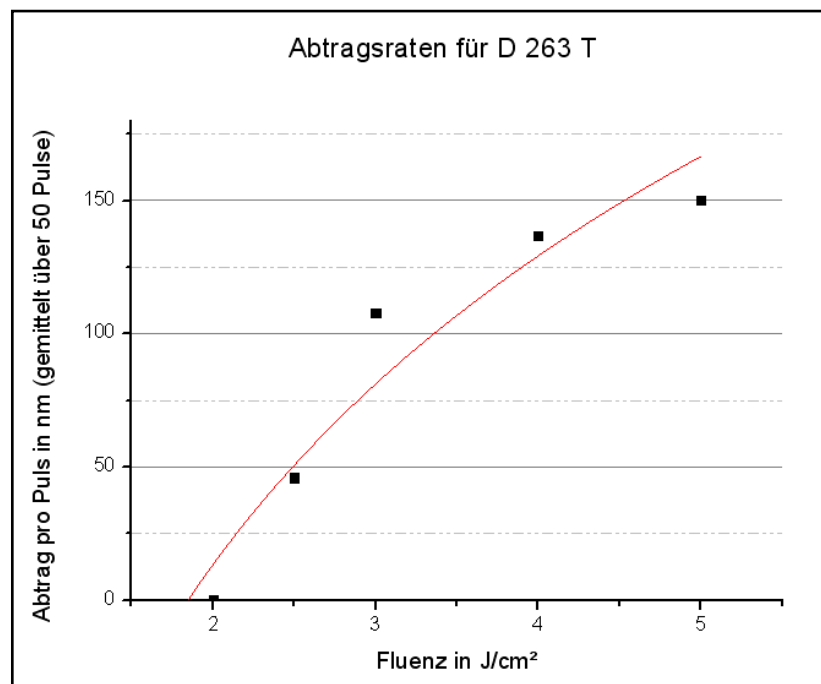


Abb. 5.24: Abtragsraten und Regression für D 263 T bei Pulswiederholfrequenzen von 1 Hz bis 50 Hz (Maske 1 mm x 1 mm).

Für die Regression ergibt sich eine Schwellfluenz von $1,8 \text{ J/cm}^2$. Bei den Versuchen für eine Fluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ kam es jedoch noch nicht zu einem Abtrag. Anhand der Abbildung 5.24 ist zu erkennen, dass es durch physikalische Effekte beim Abtrag des Materials zu einer Abweichung von der Regressionskurve kommt. So kann die Plasmabildung des abgetragenen Materials eine erhöhte Absorption des restlichen Pulses zur Folge haben, wodurch kein weiterer Abtrag mehr möglich wird.

Die von Bertram für den Fluorlaser gewonnenen Ergebnisse ergaben für die Wellenlänge von 157 nm eine Schwellfluenz von $0,36 \text{ J/cm}^2$ [27]. Im Gegensatz zum KrF-Excimerlaser trägt beim Fluorlaser daher fast die gesamte Pulsenergie zum Abtrag des Materials bei. Daher findet kaum eine nicht zum Abtrag beitragende Absorption im Material statt, die zu Spannungen und Rissen wie beim KrF-Excimerlaser führen können:

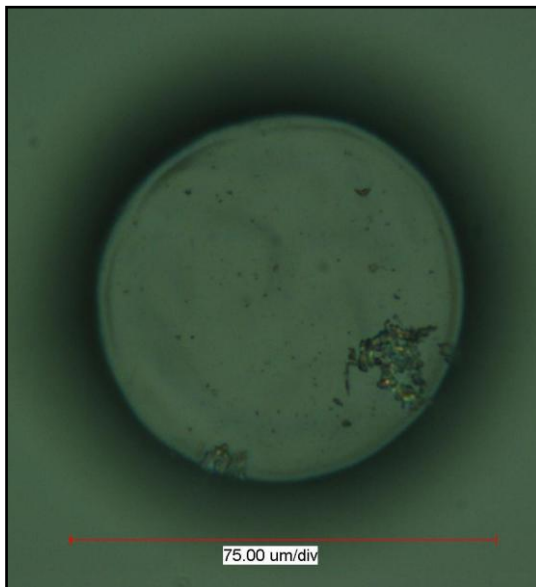


Abb. 5.25: Bohrung von D 263 T mittels Fluorlaser ($3,0 \text{ J/cm}^2$, 200 Hz, 500 Pulse) [27].

5.3 Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365

Für den Werkzeugstahl wurde nur eine Quadratmaske mit den Abmaßen $0,49 \text{ mm} \times 0,49 \text{ mm}$ verwendet, da schon Versuche mit den Masken der Abmaße $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ und $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ durchgeführt wurden. Die Abbildung der Maske besitzt damit die Abmaße $61,25 \text{ }\mu\text{m} \times 61,25 \text{ }\mu\text{m}$.

Als Testfeld wurde folgendes gewählt:

	1 Puls	100 P.	250 P.	500 P.	1000 P.
50 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 Hz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 5.26: Testfeld für die Abtragsversuche des Werkzeugstahls.

Für diese Testfelder wurden Fluenzen von $2,0 \text{ J/cm}^2$ bis $10,0 \text{ J/cm}^2$ in $1,0 \text{ J/cm}^2$ -Abständen genutzt.

Neben der Auswertung der einzelnen Felder mittels Sloan Dektak 3030 wurde auch das Laserscanning-Mikroskop „LSM 5 Pascal“ von Carl Zeiss dafür verwendet, da eine Auswertung mittels Sloan Dektak 3030 nicht für alle Felder geeignet war. Hierbei wurde auch ein Vergleich zwischen beiden Messverfahren erstellt.

Die mittels Sloan Dektak 3030 gemessenen Abtragstiefen für 100 Pulse ergaben folgendes Diagramm für die Abtragsraten:

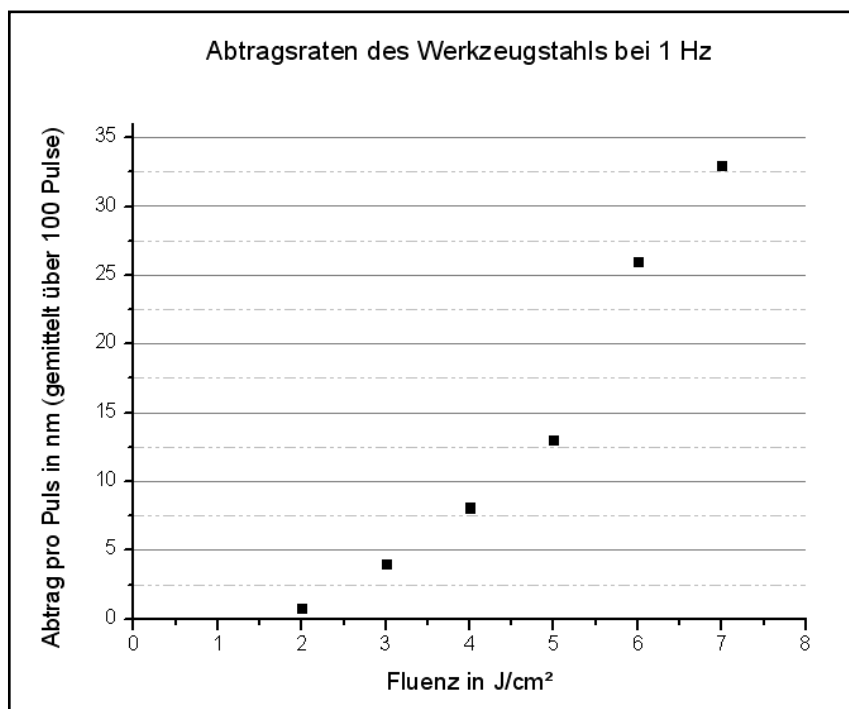


Abb. 5.27: Abtragsraten des Werkzeugstahls bei 1 Hz (0,49 mm x 0,49 mm-Maske).

Bei Abbildung 5.27 ist eine deutliche Steigerung der Abtragsrate für eine Fluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ zu erkennen, die wahrscheinlich in Zusammenhang mit einer erhöhten Oxidschichtbildung in der Struktur (s. Abbildung 5.28) und der damit einhergehenden höheren Absorption der Laserstrahlung steht. Aus diesem Grund wurde keine Regression für die Abtragsraten beim Werkzeugstahl durchgeführt.

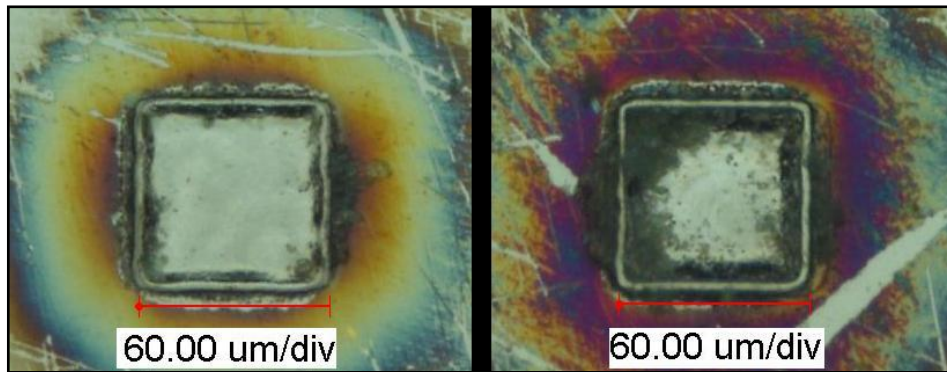
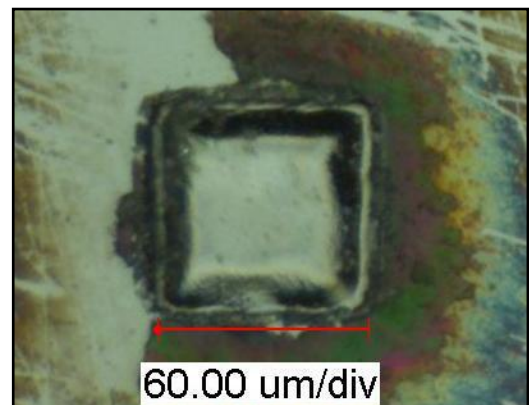


Abb. 5.28: Vergleich zweier Strukturen, hergestellt mit 1 Hz und 100 Pulsen
(links: $4,0 \text{ J/cm}^2$; rechts: $6,0 \text{ J/cm}^2$, Maske $0,49 \text{ mm} \times 0,49 \text{ mm}$).

Die für eine Verzunderung notwendige Aktivierungsenergie würde laut Abbildung 5.27 daher erst bei einer Fluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ zur Verfügung stehen. Ohne eine Verwendung von Schutzgas bei der Bearbeitung können oxidschichtfreie tiefere Strukturen damit nur durch eine Erhöhung der Pulszahlen erreicht werden. Als Beispiel dafür soll die Struktur in Abbildung 5.29 stehen, deren Abtragstiefe mit der aus Abbildung 5.28 rechts vergleichbar ist. Die Strukturturen können in Abbildung 5.30 abgelesen werden.

Abb. 5.29:
Erzeugte Struktur im Werkzeugstahl
($4,0 \text{ J/cm}^2$, 1 Hz, 500 Pulse, Maske
 $0,49 \text{ mm} \times 0,49 \text{ mm}$).



Die Abtragstiefen beim Werkzeugstahl sind abhängig von der Pulswiederholfrequenz. Für höhere Pulswiederholfrequenzen tritt dabei im Allgemeinen eine niedrigere Abtragstiefe auf. Als Übersicht der ermittelten Abtragstiefen dient Abbildung 5.30. Dargestellt sind nur die Abtragstiefen, die mittels Sloan DEKTAK 3030 messbar waren.

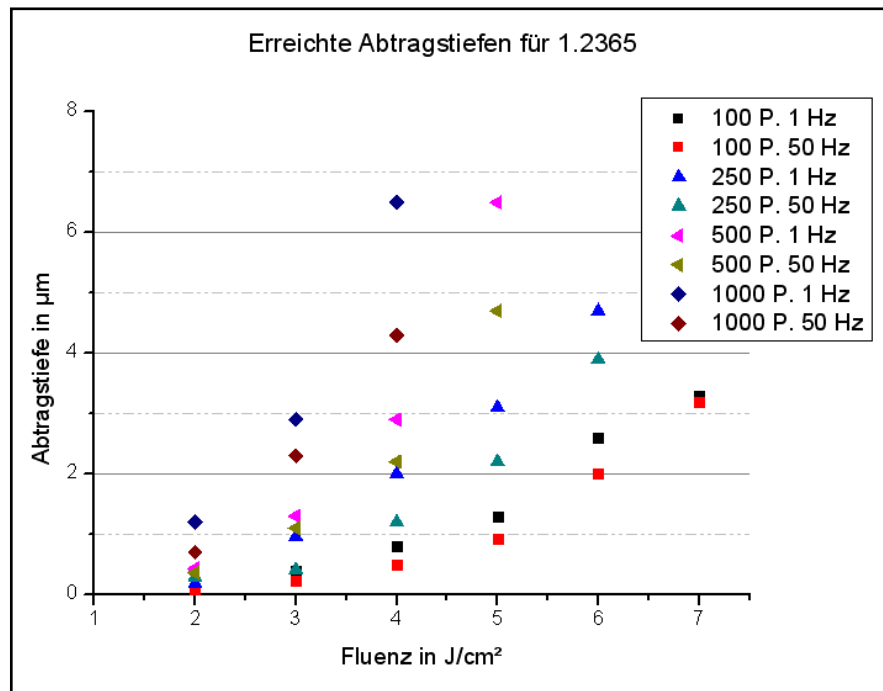


Abb. 5.30: Abtragstiefen für Werkzeugstahl bei verschiedenen Parametern, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.

Für die weiteren Strukturen ergaben sich mittels Sloan DEKTAK 3030 beispielsweise derartige Oberflächenlinienprofile:



Abb. 5.31: Oberflächenlinienprofile, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030

(links: 6,0 J/cm², 1 Hz, 500 Pulse, rechts: 7,0 J/cm², 1 Hz, 250 Pulse).

Für die in Abbildung 5.31 rechts gemessene Struktur ergab sich mittels Laserscanning-Mikroskop folgendes Profil:

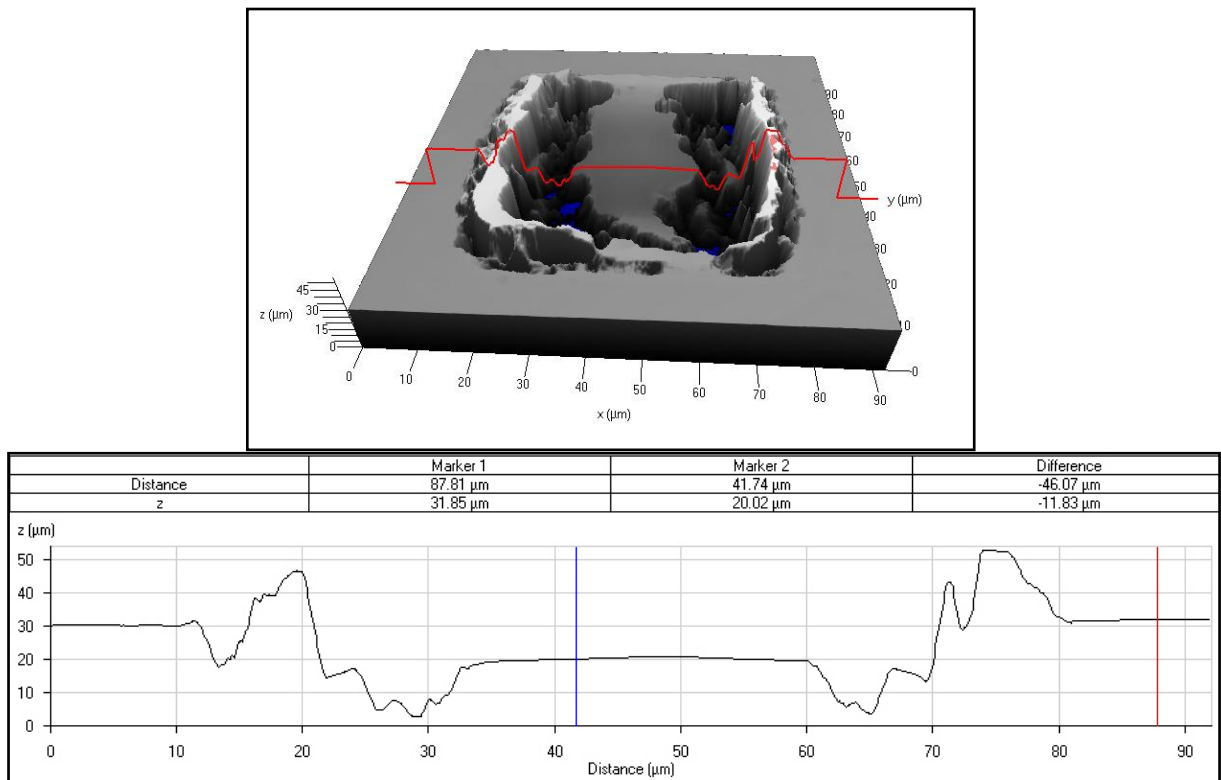
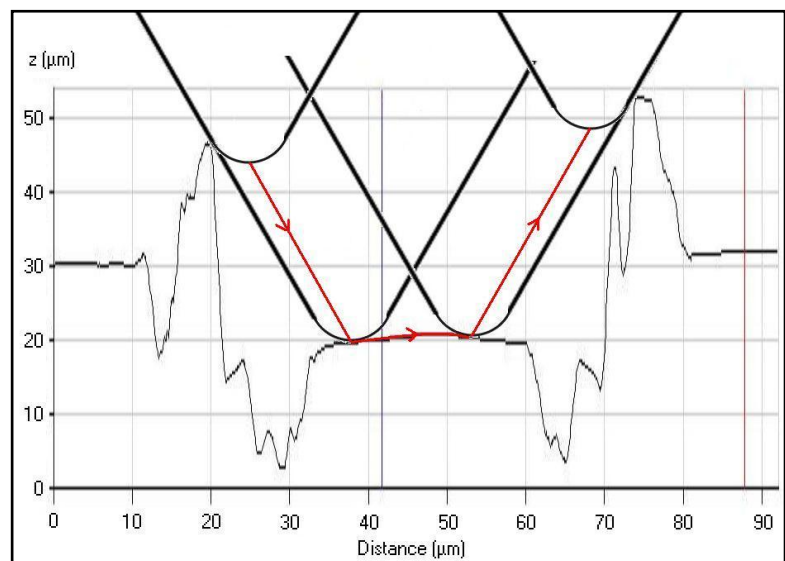


Abb. 5.32: Oberflächenprofil, gemessen mittels LSM 5 Pascal (7,0 J/cm², 1 Hz, 250 Pulse).

Durch das Laserscanning-Mikroskop erhält man ein vollkommen anderes Profil als bei der Messung mittels Sloan DEKTAK 3030, jedoch konnte auch das LSM nicht den ganzen Strukturboden erfassen, wie man anhand der blauen Flächen im oberen Bild der Abbildung 5.32 erkennt. Wie es zu dem in Abbildung 5.31 rechts dargestellten Profil kommt, kann man nachvollziehen, wenn man das Profil des LSM für x- und y-Richtung einheitlich skaliert und den Verfahrensweg der Messnadel nachbildet:

Abb. 5.33:
Schematische Vermessung der
Struktur für 7,0 J/cm², 1 Hz,
250 Pulse mittels
Sloan DEKTAK 3030.



Je tiefer eine Struktur ist, desto weniger Fläche kann das Profilometer vom Strukturboden erfassen, wodurch die Vertiefungen an den Strukturbodenrändern der Struktur aus Abbildung 5.33 nicht vermessen werden können. Die hohen Aufwürfe an den Strukturseiten vermindern dabei die maximale Tiefe, die das Profilometer erfassen kann.

Das Linienprofil des LSM zeigt dabei jedoch auch eine Schwäche auf, die diese Messmethode besitzt. Da die Strukturhöhen über die Intensität der Rückreflexe ausgewertet werden, können Verunreinigungen, die eine höhere Absorption für die benutzte Wellenlänge des Rasterlasers besitzen, das System täuschen. Dadurch werden Strukturvertiefungen angezeigt, wo es keine gibt. Die links in Abbildung 5.32 dargestellte Vertiefung neben der Struktur ist ein Beispiel dafür. Aufgrund der Verzunderungen im Strukturbereich kann hier ebenfalls ein verzerrtes Bild widergegeben werden.

Unstrittig ist hierbei jedoch das Auftreten von Vertiefungen an den Rändern der Strukturböden, die schon bei geringeren Fluenzen auftreten und durch Reflexionen an den Strukturwänden entstehen. Für geringere Abtragstiefen konnten diese Vertiefungen auch mittels Sloan DEKTAK 3030 gemessen werden.

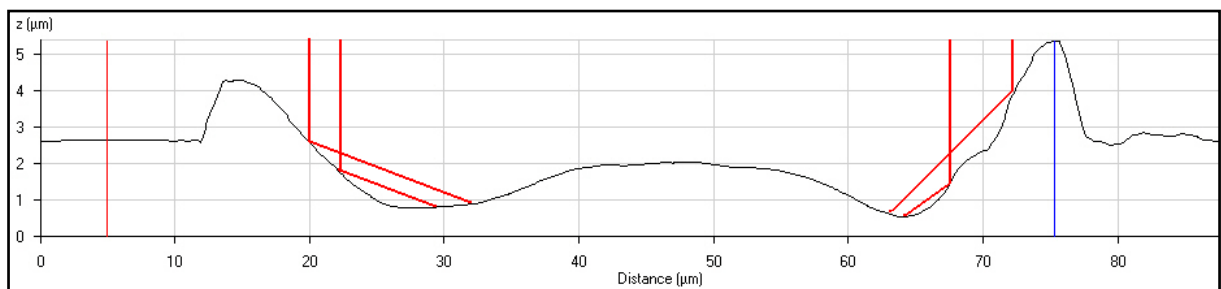


Abb. 5.34: Schematische Darstellung der Reflexion von Laserstrahlung an den Strukturwänden anhand eines Oberflächenlinienprofils, gemessen mittels LSM 5 Pascal (Bearbeitungsparameter der Struktur: 3 J/cm², 1 Hz, 500 Pulse).

Eine zuerst in den Randbereichen auftretende Verzunderung, wie sie in Abbildung 5.28 rechts zu sehen ist, lässt sich ebenfalls durch die Reflexionen an den Strukturwänden und der dadurch erhöhten Fluenz in diesen Gebieten erklären (s. Abb. 5.34).

Die tieferen Strukturen, die mittels Sloan DEKTAK 3030 nicht mehr vermessen werden konnten, konnten mit Hilfe des LSM 5 Pascal ebenfalls nicht bzw. nur sehr schlecht vermessen werden, so dass eine Auswertung schlecht möglich war und die teilweise gewonnenen Ergebnisse anzuzweifeln sind.

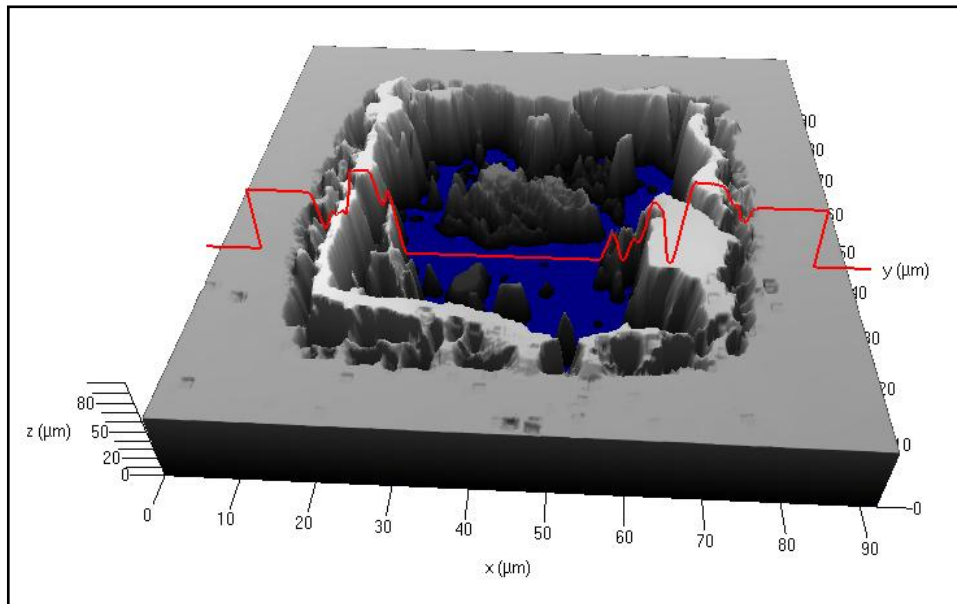


Abb. 5.35: Strukturprofil für die Bearbeitungsparameter $7,0 \text{ J/cm}^2$, 1 Hz, 500 Pulse, gemessen mittels LSM 5 Pascal.

Der Vergleich der ermittelten Abtragstiefen der zwei Messverfahren zeigt, dass es nur geringe Abweichungen gibt. Als Ursachen dafür sind zu nennen, dass die beim LSM genutzten Linienprofile nicht exakt zum Verfahrensweg der Prüfnadel des Sloan DEKTAK 3030 passen und dass eine arithmetische Mittelwertbildung der Strukturtiefe beim LSM 5 Pascal nicht möglich war, sondern dieser geschätzt werden musste.

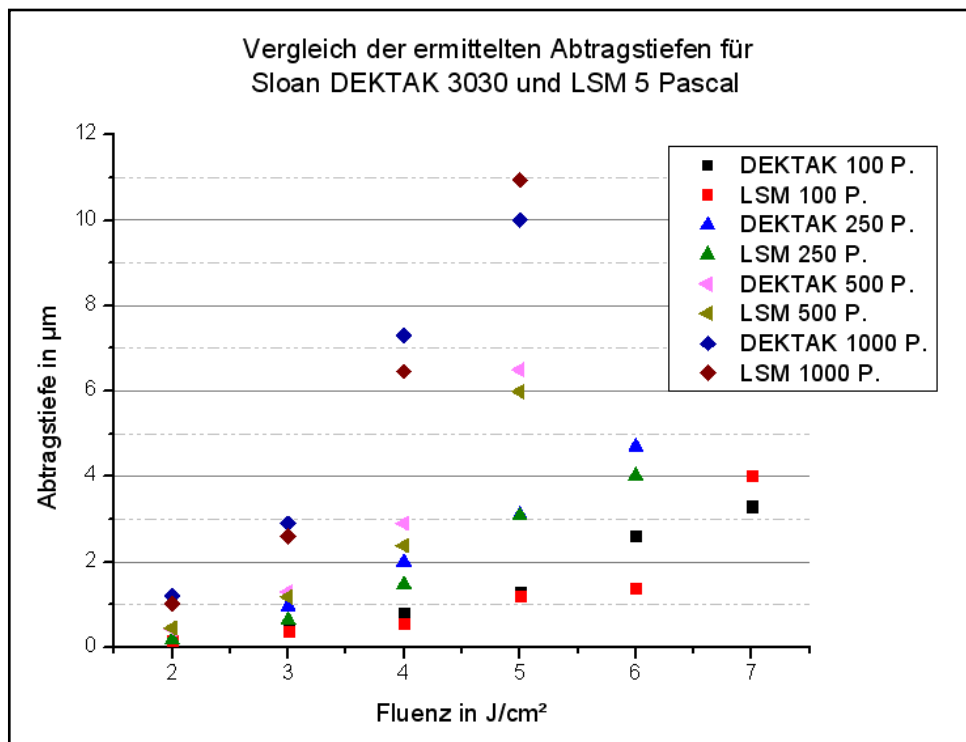


Abb. 5.36: Vergleich der ermittelten Abtragstiefen bei Werkzeugstahl für die Messsysteme Sloan DEKTAK 3030 und LSM 5 Pascal.

5.3.1 Erzeugung von Sackbohrungen in Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365

Bohrungen in Stählen besitzen viele Anwendungsbereiche vor allem in der Mikromechanik als Komponenten von Mikropumpen, Einspritzdüsen, Mikroreaktoren und Ventilen. Ein großflächiger Einsatz von Sackbohrungen für tribologische Untersuchungen zur Verkleinerung des Reibungswiderstandes zweier mechanischer Komponenten ist ebenfalls denkbar. Die in Kapitel 3.1.4 beschriebenen Verfahren, die herkömmlicherweise zur Erzeugung der Mikrobohrungen verwendet werden, besitzen jedoch ihre Grenzen, so dass Bohrungen kleiner als 25 μm Durchmesser nicht zu realisieren sind. Mit Hilfe der Laserbearbeitung sind dagegen kleinere Durchmesser möglich, wodurch sich neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen würden. Daher wurden Versuche mit einer Kreismaske durchgeführt, die einen Durchmesser von 80 μm besaß. Die daraus resultierende Abbildung auf der Probenoberfläche hatte damit einen Durchmesser von 10 μm . Als Parametertestfeld wurde folgendes gewählt:

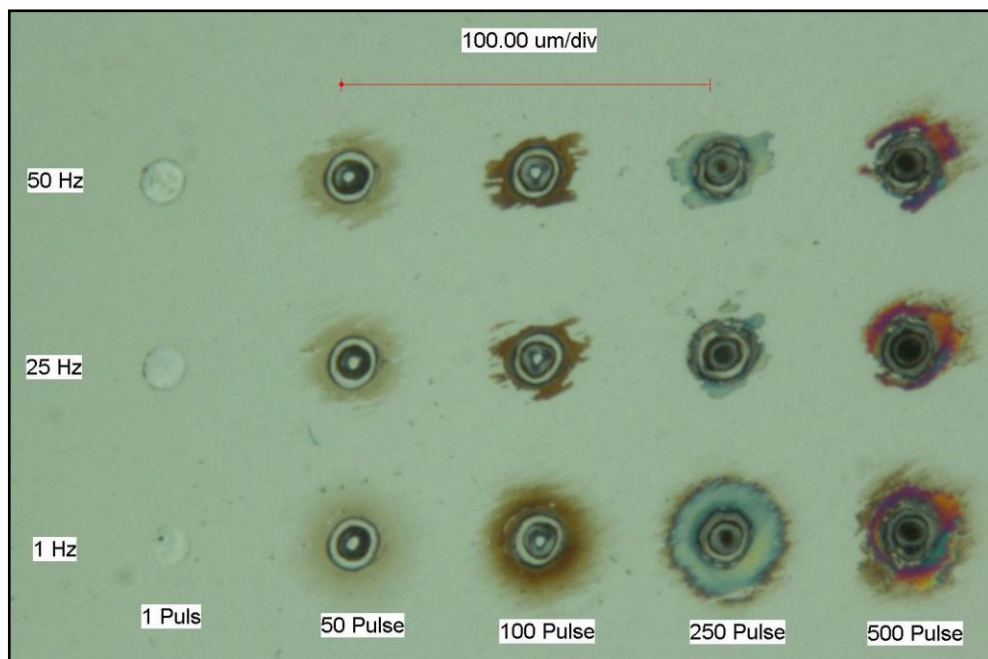


Abb. 5.37: Parameterfeld für die Sackbohrungen in 1.2365 (Bearbeitung mit 5,0 J/cm²).

Die Fluenzen für die Bearbeitung betrugen 2,0 J/cm² bis 8,0 J/cm² in 1,0 J/cm²-Abständen. Eine Ausmessung der Ergebnisse mittels Sloan DEKTAK 3030 war aufgrund der geringen Strukturgröße nicht mehr möglich, wodurch das LSM 5 Pascal dafür eingesetzt wurde. Dabei konnten jedoch nicht alle Bohrungen ausgemessen werden. Die maximal auswertbare Tiefe der Bohrlöcher mit dem LSM 5 Pascal lag bei rund 3 μm . Zu hohe Rückreflexionen aufgrund der Bohrlochgeometrie führten hierbei teilweise zu Erhebungen in der Lochmitte (s. Abbildung 5.38 links), bei weiteren konnte die Tiefe nicht mehr aufgelöst werden. Verzunderungen und Ablagerungen in der Bohrlochgeometrie könnten hierbei auch zu einer erhöhten Absorption der Rasterlaserstrahlung geführt haben, wodurch fehlerbehaftete Messwerte entstanden.

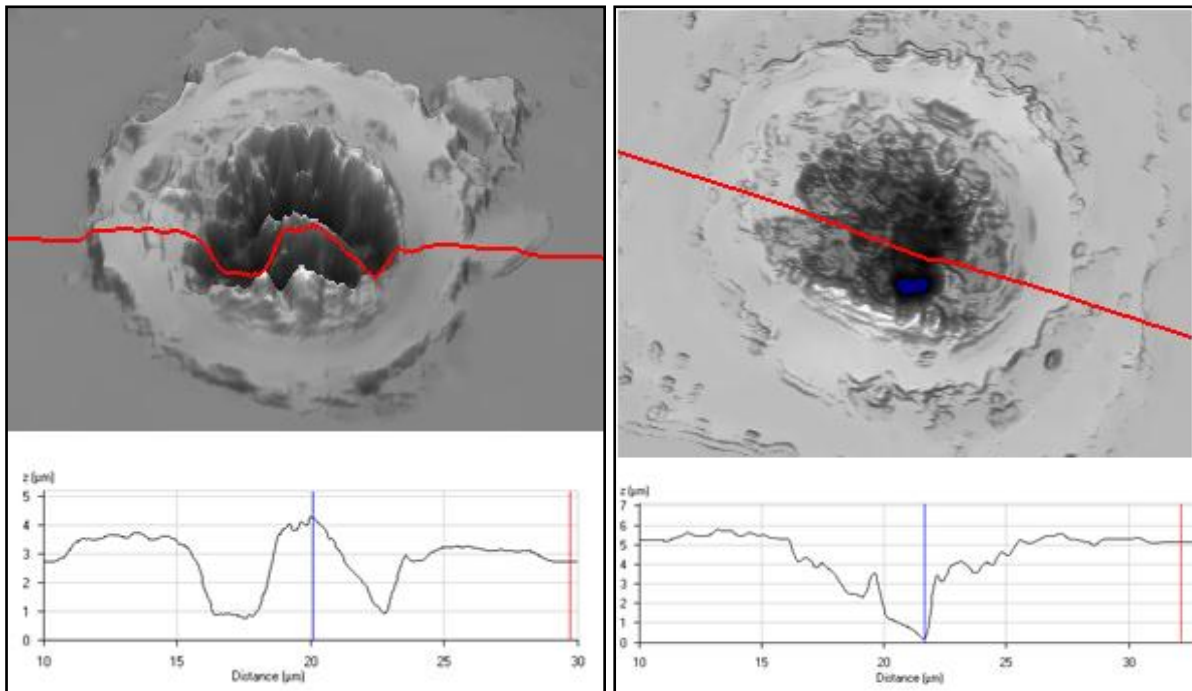


Abb. 5.38: Nicht auswertbare Oberflächenprofile, gemessen mittels LSM 5 Pascal
(links: $6,0 \text{ J/cm}^2$, 1 Hz, 250 Pulse; rechts: $5,0 \text{ J/cm}^2$, 50 Hz, 500 Pulse).

Als Beispiel für eine gut auswertbare Messung soll Abbildung 5.39 dienen:

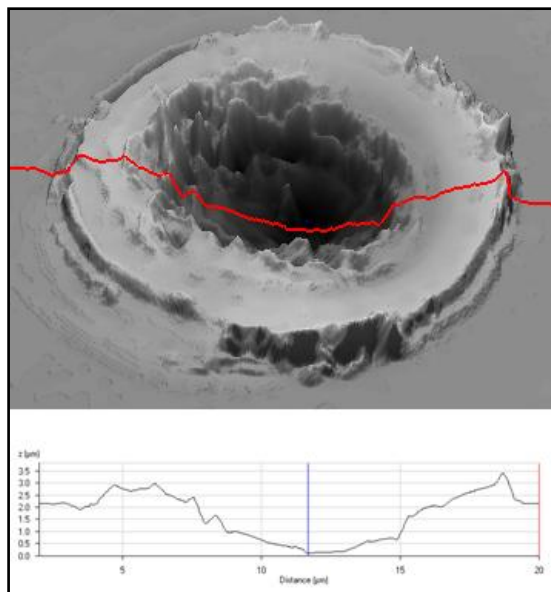


Abb. 5.39: Oberflächenprofil, gemessen mittels LSM 5 Pascal
($6,0 \text{ J/cm}^2$, 1 Hz, 50 Pulse).

Abbildung 5.40 zeigt die ermittelten Tiefen der Bohrlöcher für die jeweiligen Parameter. Eine Abhängigkeit von der Pulswiederholfrequenz konnte bei diesen Versuchen nicht festgestellt werden.

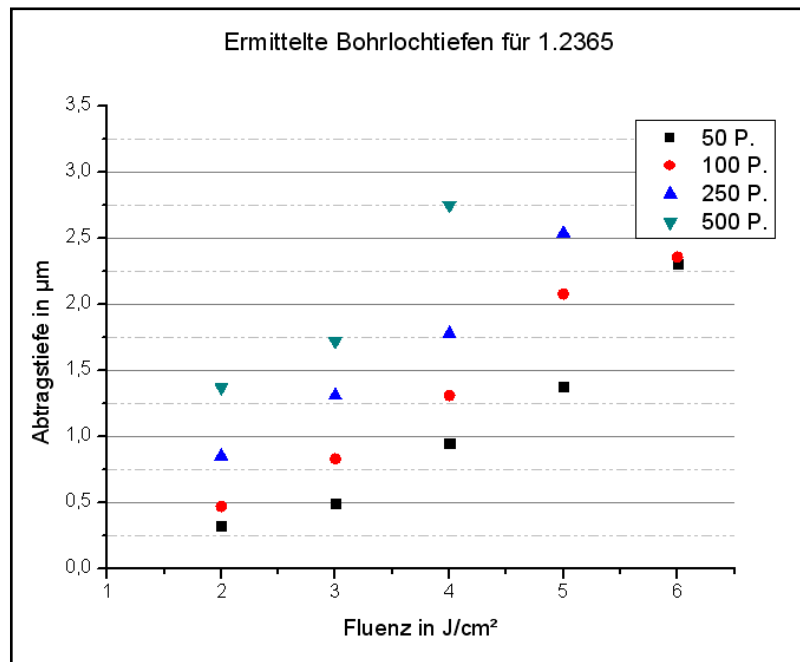


Abb. 5.40: Ermittelte Bohrlochtiefen für die Kreismaske mit $\varnothing 80 \mu\text{m}$ bei Werkzeugstahl.

Die Regression für die Abtragsrate pro Puls, die über 100 Pulse gemittelt wurde, ergab eine Schwellfluenz von $1,7 \text{ J/cm}^2$ und einen Absorptionskoeffizienten von $52,6 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

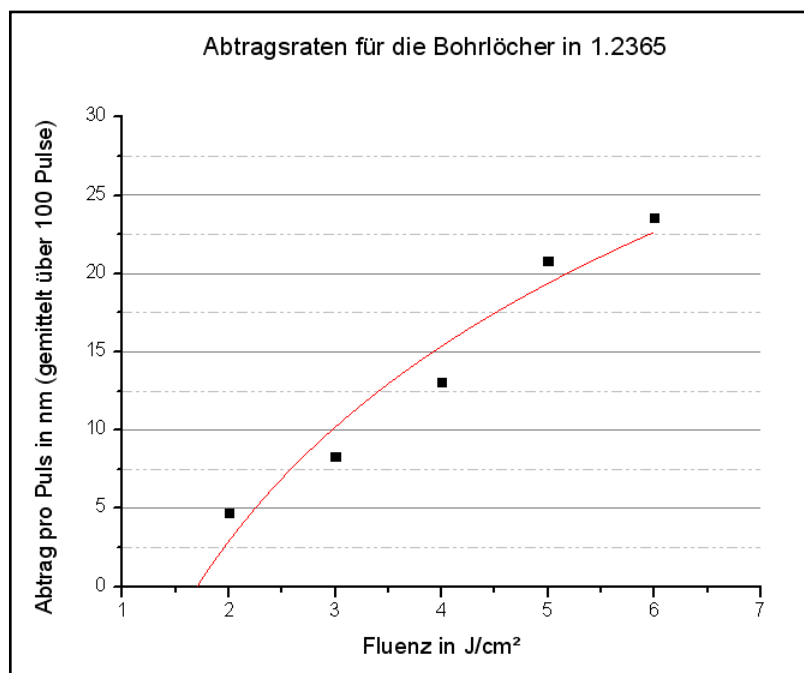


Abb. 5.41: Abtragsraten und Regression für 1.2365 (Kreismaske $\varnothing 80 \mu\text{m}$).

Eine Nachbearbeitung der Bohrungen wäre aufgrund der Aufwürfe an den Strukturwänden erforderlich.

6 Strukturierung von Metallfolien

Metallfolien weniger Mikrometer Dicke sind Ausgangspunkt für die Herstellung verschiedenster Komponenten in der Mikrotechnologie. Über mechanische Getriebeteile bis hin zu optischen Gittern findet sich ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten. Eine Strukturierung mittels KrF-Excimerlaser könnte hierbei neue Möglichkeiten und damit Anwendungsbereiche eröffnen, um das Spektrum zu erweitern.

6.1 Bohrungen in 5 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301)

Für die Bohrversuche in 5 µm dicker Edelstahlfolie der Werkstoffnummer 1.4301 wurden Fluenzen im Bereich 5,0 J/cm² bis 10,0 J/cm², Pulszahlen von 400 bis 1000 und Pulswiederholfrquenzen von 1 Hz bis 50 Hz verwendet. Es kam die selbe Maske wie in Kapitel 5.3.1 zum Einsatz. Die dabei erzielten Durchmesser der Bohrungen lagen im Bereich von 2,6 µm bis 6,8 µm.

Um eine gleichmäßige Fokusslage auf der Oberfläche der sehr biegsamen Folie zu gewährleisten, wurde diese auf einem ebenen Substrat (Glaswafer) fixiert. Ein Verbiegen der Folie während der Bearbeitung konnte dabei nicht gänzlich verhindert werden, wodurch es vor allem bei hohen Pulswiederholfrquenzen zu einer Ausbildung von ovalen Bohrlöchern kam.

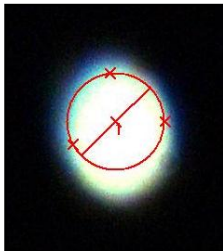


Abb. 6.1: Ovalförmige Ausbildung des Bohrloches bei 7,0 J/cm², 50 Hz, 700 Pulse (d = 4,1 µm).

Die Größe des Bohrloches ist maßgeblich abhängig von der verwendeten Pulsanzahl. Nachfolgende Tabelle zeigt die Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers von der Pulsanzahl bei einer Fluenz von 7,0 J/cm² und eine Pulswiederholfrquenz von 50 Hz:

Tabelle 11: Bohrlochdurchmesser für 7,0 J/cm² und 50 Hz.

Pulsanzahl	400	500	600	700	800	900
Bohrlochdurchmesser	2,6 µm	3,3 µm	4,0 µm	3,6 µm	4,1 µm	4,8 µm

Das beste Resultat aller verwendeten Parameter (s. Anlage 1) lieferte eine Fluenz von $9,0 \text{ J/cm}^2$, eine Pulswiederholfrequenz von 25 Hz und eine Pulsanzahl von 700:



Abb. 6.2: Durchlichtmikroskopische Aufnahme des Bohrloches bei $9,0 \text{ J/cm}^2$, 25 Hz, 700 Pulse ($d = 6,8 \text{ µm}$).

An den Strukturrändern kam es wie beim Material 1.2365 zu Aufwürfen. Eine Nachbearbeitung wäre demzufolge erforderlich, ist aber bei solchen dünnen Folien schwer zu realisieren.

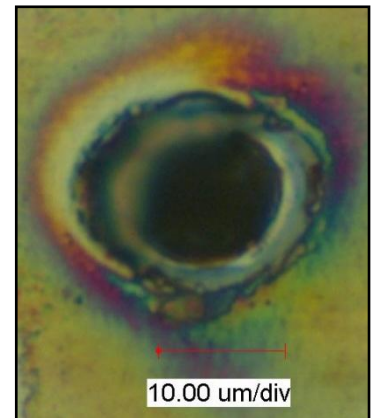


Abb. 6.3:
Oberfläche der Bohrung für $9,0 \text{ J/cm}^2$, 25 Hz, 700 Pulse.

6.2 Erzeugung von Gitterstrukturen in 5 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301)

Für die Erzeugung der Gitterstrukturen wurde die Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm verwendet. Aufgrund der wesentlich größeren Bearbeitungsfläche als in 6.1 war hierbei die Fixierung der Folie mit Klebeband auf eine Glasplatte nicht geeignet. Eine zu starke Wölbung der Metallfolie während der Bearbeitung verhinderte bessere Ergebnisse. So wurde die Edelstahlfolie zwischen zwei Rahmen gespannt, die mit Schrauben aneinander gepresst werden konnten. Die Folie hing somit in der Luft und hatte keine Unterlage mehr.

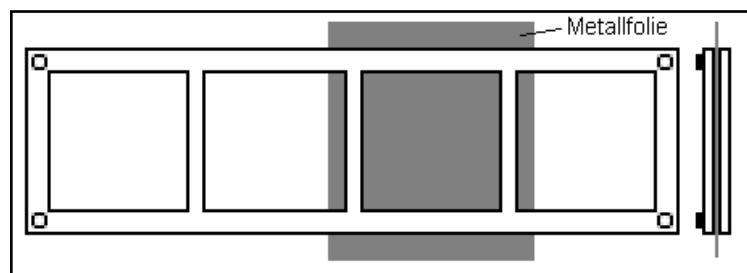


Abb. 6.4: Spannvorrichtung für die Metallfolien.

Ziel für die Gitterstrukturen war, kleinstmögliche Stegbreiten zu erzeugen. Begonnen wurde mit Versuchen, Stegbreiten von 70 µm zu erreichen.

In Folge der Suche nach geeigneten Parametern für dieses Vorhaben wurde festgestellt, dass zu hohe Fluenzen zur Folge haben, dass durch den Energieeintrag die Stege weggerissen werden. Für die Stegbreite mit $70\text{ }\mu\text{m}$ war das ab einer Fluenz von $6,0\text{ J/cm}^2$ der Fall. Gearbeitet wurde daher zunächst mit einer Fluenz von $4,0\text{ J/cm}^2$ und einer Pulswiederholfrequenz von 10 Hz , um die Belastung der Stege möglichst gering zu halten. Durch die alleinige Nutzung der Fluenz von $4,0\text{ J/cm}^2$ kam es zu einer starken Gratbildung an den Stegen.



Abb. 6.5: Durchlichtmikroskopische Aufnahme der Gratbildung bei $4,0\text{ J/cm}^2$, 10 Hz , 1000 Pulsen.

Eine Verringerung der Grate konnte durch den anschließenden Einsatz höherer Fluenzen erreicht werden. Durch die geringe zu bearbeitende Restfläche wurden die Stege dabei nicht so stark belastet, weshalb es zu keinem Wegreißen dieser kommt.

Mit verschiedenen Parametervariationen konnten dabei qualitätsmäßig vergleichbare Ergebnisse erzielt werden:

- 500 Pulse bei $4,0\text{ J/cm}^2$ + 100 Pulse bei $8,0\text{ J/cm}^2$ + 100 Pulse bei $14,0\text{ J/cm}^2$ (Pulswiederholfrequenz 10 Hz)
- 1000 Pulse bei $4,0\text{ J/cm}^2$ + 500 Pulse bei $12,0\text{ J/cm}^2$ (50 Hz)
- 500 Pulse bei $4,0\text{ J/cm}^2$ + 100 Pulse bei $8,0\text{ J/cm}^2$ + 100 Pulse bei $12,0\text{ J/cm}^2$ (50 Hz)

Dabei wurden die einzelnen Gitterflächen zuerst mit der niedrigeren Fluenz bearbeitet und anschließend mit der höheren Fluenz.

Eine komplette Entfernung der Grate nur aufgrund der Laserbearbeitung ist bei den oben verwendeten Parametervariationen nicht gelungen, konnte jedoch sehr leicht mit mechanischen Mitteln realisiert werden.

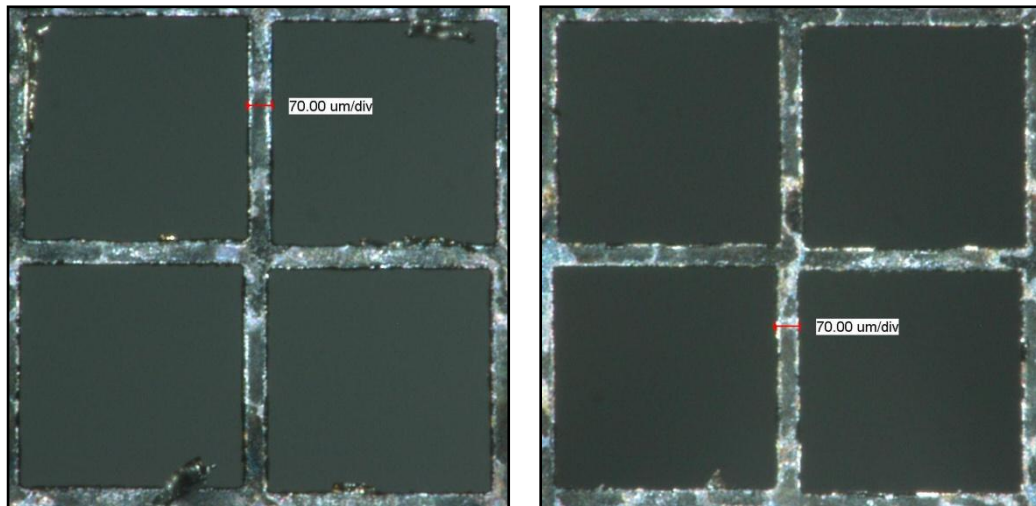


Abb. 6.6: Gitterstrukturen, bearbeitet mit $4,0 \text{ J/cm}^2$, 1000 Pulse + $12,0 \text{ J/cm}^2$, 500 Pulse bei 50 Hz (links: ungereinigt, rechts: gereinigt).

Für eine Stegbreite von $70 \mu\text{m}$ konnten dabei auch größere Gitterflächen erzeugt werden:

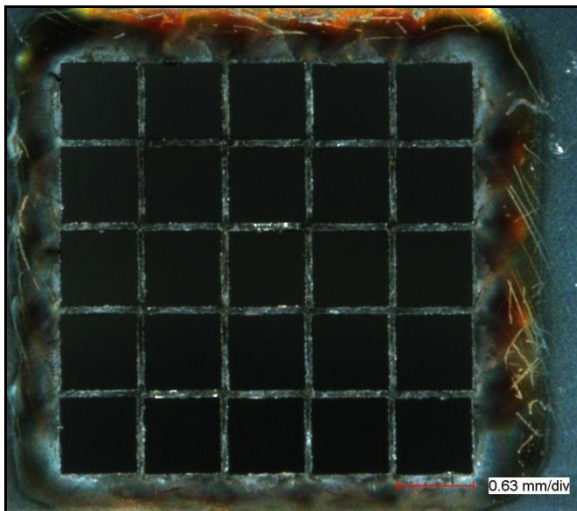


Abb. 6.7: Gitterstruktur, bearbeitet mit $4,0 \text{ J/cm}^2$, 500 Pulse + $8,0 \text{ J/cm}^2$, 100 Pulse + $14,0 \text{ J/cm}^2$, 100 Pulse bei 10 Hz (gereinigt).

Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskop zeigten Anschmelzungen an den Gitterrändern und Ablagerungen auf den Stegen:

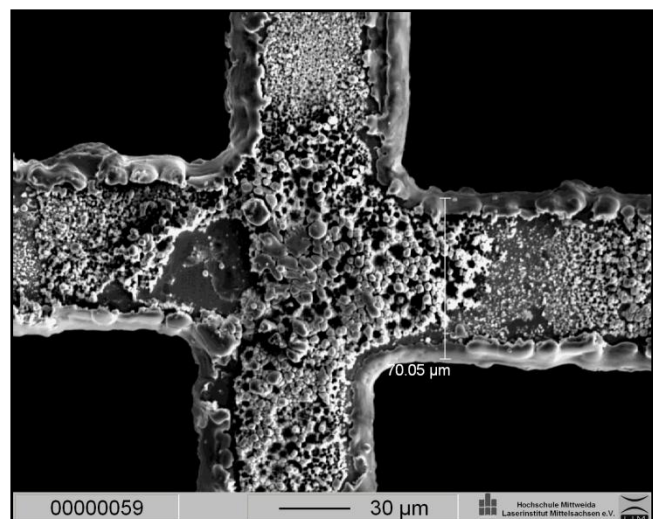
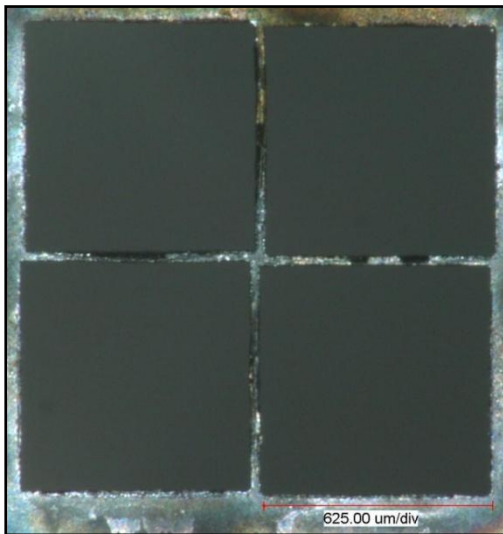


Abb. 6.8:
REM-Aufnahme eines Gitterkreuzes,
Bearbeitungsparameter $4,0 \text{ J/cm}^2$, 500 Pulse +
 $8,0 \text{ J/cm}^2$, 100 Pulse + $14,0 \text{ J/cm}^2$, 100 Pulse
bei 10 Hz.

Eine Reinigung der Strukturen mittels Ionenstrahl-Ätzen wird geprüft. Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Diplomabgabe noch nicht vor.



Mit den Bearbeitungsparametern 1000 Pulse bei $4,0 \text{ J/cm}^2$ + 1000 Pulse bei $12,0 \text{ J/cm}^2$ (50 Hz) konnten Stegbreiten von rund $30 \text{ }\mu\text{m}$ realisiert werden. Die Stegbreite lag dabei zwischen $22 \text{ }\mu\text{m}$ und $32 \text{ }\mu\text{m}$. Die in Abbildung 6.9 dargestellten senkrecht verlaufenden Stege waren dabei dünner als die waagrecht verlaufenden.

Abb. 6.9: Gitterstruktur mit Stegbreiten von rund $30 \text{ }\mu\text{m}$.

Beim Versuch zur Herstellung von $20 \text{ }\mu\text{m}$ breiten Stegen war hierbei ersichtlich, dass die Stegbreitenschwankung der Maske geschuldet war, die nicht die gewünschten quadratischen Maße besaß.

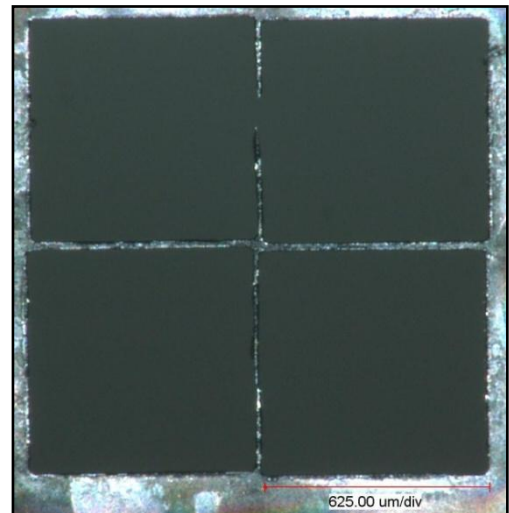


Abb. 6.10:
Kaputter Steg beim Versuch der Erzeugung von $20 \text{ }\mu\text{m}$ breiten Stegen aufgrund der nicht quadratischen Maße der Maske.

Durch eine Vergrößerung der Wegstrecke in X-Richtung konnte dieser Fehler ausgeglichen werden.



Die für die vorherigen Versuche benutzten Parameter führten zu einem Wegreißen der Stege, so dass weitere Parametervariationen ausprobiert wurden. Das in Abbildung 6.11 dargestellte Ergebnis wurde mit 2000 Pulsen bei $3,0 \text{ J/cm}^2$ + 1000 Pulsen bei $4,0 \text{ J/cm}^2$ + 1000 Pulsen bei $6,0 \text{ J/cm}^2$ + 1000 Pulsen bei $8,0 \text{ J/cm}^2$ (Pulswiederholfrequenz 10 Hz) angefertigt. Die Breite der Stege lag dabei zwischen 20 µm und 25 µm .

Abb. 6.11: Gitterstruktur mit Stegbreiten von rund 20 µm .

Für die Herstellung der 20 µm breiten Stege war es neben den neu genutzten Parametern notwendig, alle 50 Pulse ein anderes Gittersegment anzufahren, da sich bei höheren Pulszahlen durch die entstehende Wölbung der Folie die Stege so verbogen haben, dass bei einer weiteren Bearbeitung der einzelnen Segmente die Stege in Mitleidenschaft gezogen wurden.

Die Qualität der Gitterstrukturen hängt neben den Ablagerungen durch die Bearbeitung vor allem von der Qualität der Maske ab. Durch die Versuche wurde erkannt, dass die Maske leicht verkippt im Probenhalter positioniert war. Folge dessen war ein Versatz der Stege zueinander.

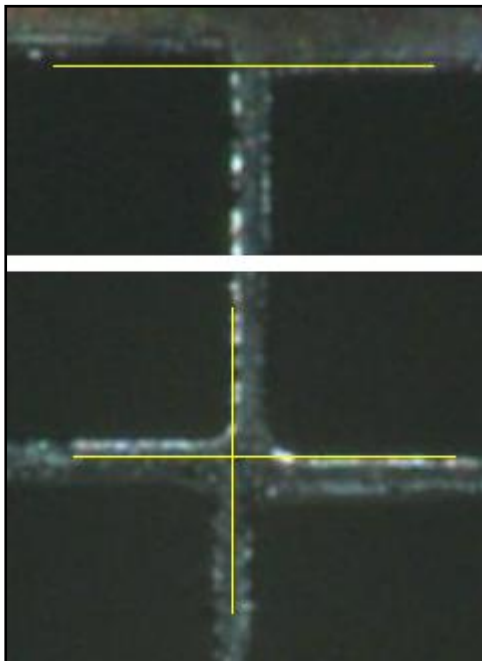
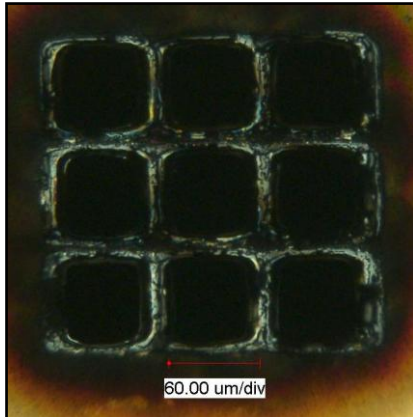


Abb. 6.12: Ausschnitte aus Abbildung 6.11, vergrößert dargestellt.

Ein Erreichen von Stegbreiten unter 20 µm ist durch Optimierung der Maskenposition und einer automatisierten Spannvorrichtung für die Folie, um Wölbungen während der Bearbeitung zu vermeiden bzw. zu verringern, denkbar.

Durch kleinere Abtragsflächen und der damit einhergehenden geringeren Belastung des Materials sind ebenfalls geringere Stegbreiten vorstellbar. Erste Ergebnisse mit der Maske der Abmaße 0,49 mm x 0,49 mm wiesen für die Parameterfolge 2000 Pulse bei 4,0 J/cm² + 1000 Pulse bei 6,0 J/cm² + 1000 Pulse bei 10,0 J/cm² (50 Hz) durch Ablagerungen und



Anschmelzungen starke Verrundungen an den Ecken der Abtragsflächen auf. Nach jeder Benutzung einer Fluenz wurde dabei die nächste Gitterfläche angefahren. Weitere Parametervariationen zur Qualitätsverbesserung der Struktur müssen noch getestet werden.

Abb. 6.13: Gitterstruktur mit rund 10 µm breiten Stegen.

6.3 Strukturierung von 50 µm dicker Edelstahlfolie (1.4301)

In die 50 µm dicke Edelstahlfolie der Werkstoffnummer 1.4301 wurden ebenfalls mit der 5 mm x 5 mm-Maske Gitterstrukturen eingebracht. Mit den Parametern 5000 Pulse bei 6,0 J/cm² + 20000 Pulse bei 8,0 J/cm² (50 Hz) konnten hierbei Stege mit einer Breite von 30 µm realisiert werden. Das Anfahren eines neuen Gittersegmentes erfolgte nach jeder Fluenz. Anhand der Abbildung 6.14 kann man wiederum den Einfluss der Maskenposition erkennen, die zu einer Versetzung der Stege zueinander führt. Der Einfluss der Maskenqualität ist sehr gut anhand der Riefen an den Stegen zu erkennen. Ablagerungen auf den Stegen schmälern zusätzlich die Qualität der Gitterstruktur.

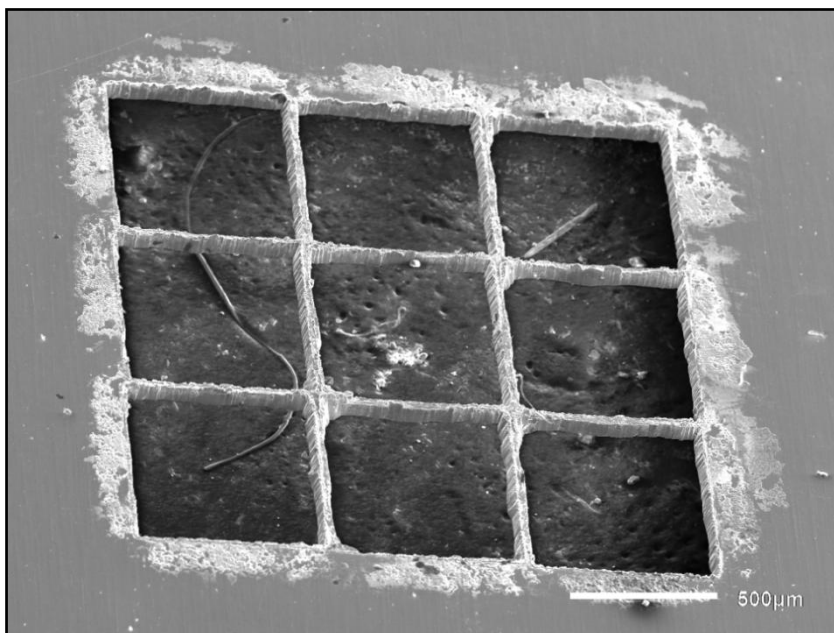


Abb. 6.14: Gitterstruktur mit rund 30 µm breiten Stegen, hergestellt mit den Parametern 6,0 J/cm², 5000 Pulse + 8,0 J/cm², 20000 Pulse bei 50 Hz Pulswiederholfrequenz.

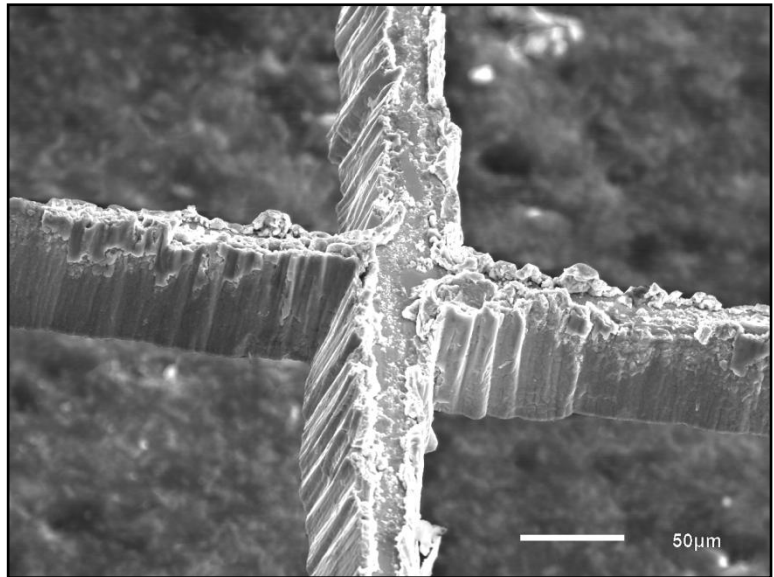
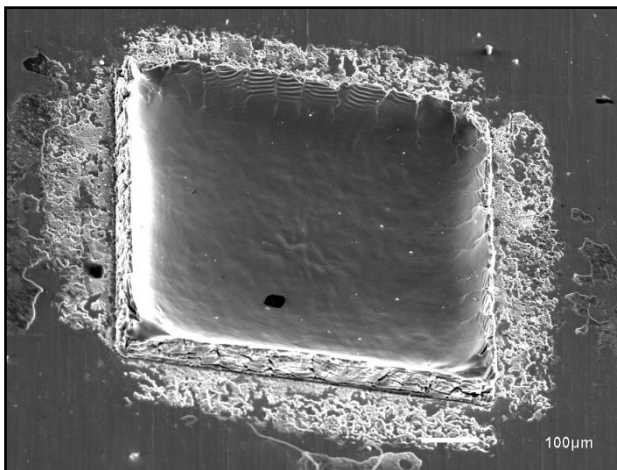


Abb. 6.15:
Gitterkreuz aus der in Abbildung
6.14 dargestellten Struktur.

Neben der Herstellung von Gitterstrukturen wurden Versuche zum Abtragsverhalten der Folie durchgeführt. Zum einen wurden dabei quadratische Vertiefungen in die Folie eingebracht, um den maximalen Abtrag ohne Durchschuss der Folie zu ermitteln, zum anderen wurden Versuche zum flächigen Abtrag der Folie unternommen.

Mit der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm wurden im Burst-Modus Vertiefungen in die Folie eingebracht. Dafür wurde eine Fluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ gewählt. Mit einer Pulswiederholfrequenz von 50 Hz wurden dabei im Abstand von 500 Pulsen Vertiefungen mit



1000 Pulsen bis 3000 Pulsen erzeugt. Bei einer Pulszahl von 2500 Pulsen entstand dabei der erste Durchschuss, zu sehen in Abbildung 6.16 als kleiner schwarzer Fleck.

Abb. 6.16: REM-Aufnahme einer Struktur,
erzeugt mit $6,0 \text{ J/cm}^2$, 2500 Pulse, 50 Hz.

Gut zu sehen sind Spannungsrisse, die an den Rändern der Struktur entstanden.

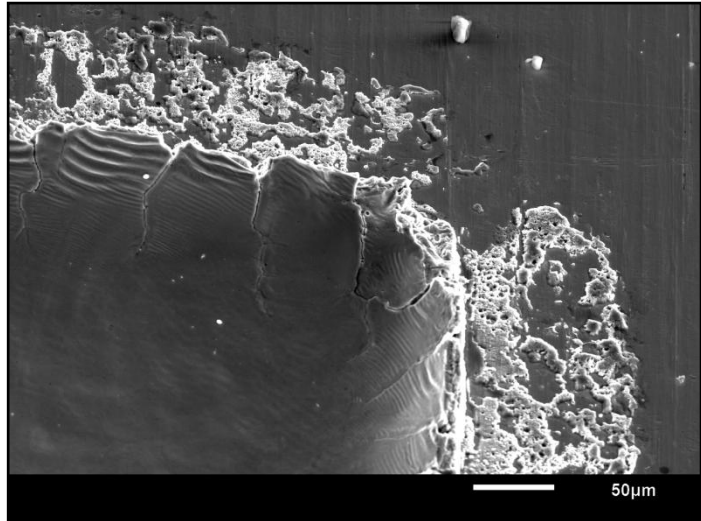
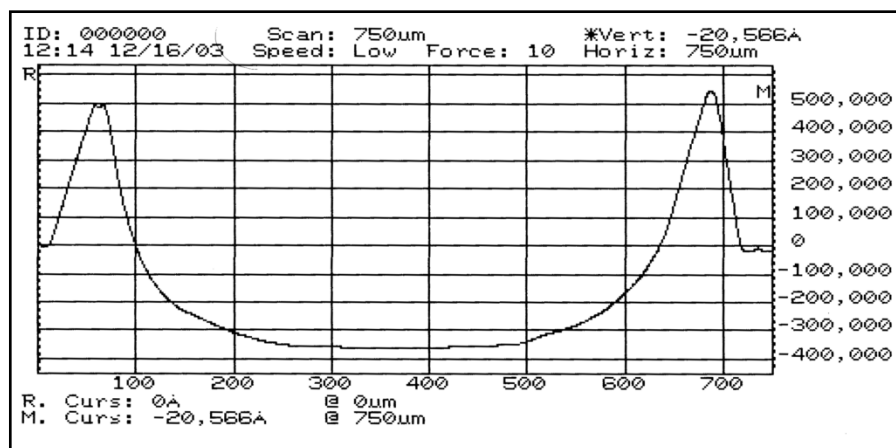


Abb. 6.17:
Ausschnitt aus der in Abbildung 6.16
dargestellten Struktur.

Die Aufwürfe an den Strukturrändern waren für die Strukturen höher als die Abtragstiefe. Das bei den REM-Aufnahmen erkennbare runde Oberflächenprofil wurde mit dem Sloan DEKTAK 3030 bestätigt. Die Abtragstiefen der Strukturen ergaben sich zu 21 μm bei 1000 Pulsen, 28 μm bei 1500 Pulsen und 36 μm bei 2000 Pulsen.



**Abb. 6.18: Oberflächenlinienprofil der Struktur für 6,0 J/cm², 2000 Pulse,
50 Hz, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.**

Für den Flächenabtrag der Edelstahlfolie wurde die Maske der Abmaße 0,49 mm x 0,49 mm verwendet. Als Parameter für die Bearbeitung wurden eine Fluenz von 5,0 J/cm², ein Pulsüberlapp von 98 % und eine Pulswiederholfrequenz von 50 Hz verwendet. Für diese Parameter wurden drei Strukturen hergestellt: Mit 1, mit 2 und mit 3 Überfahrten. Die gewonnenen Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend. Bei einer durchschnittlichen Abtragstiefe von 4,1 μm, 8,9 μm und 12,5 μm ergaben sich Rauigkeiten R_a von 1,4 μm, 1,8 μm und 7,7 μm. Ein definierter Abtrag war daher nicht gegeben, weshalb weitere Versuche zum Flächenabtrag nicht unternommen wurden.

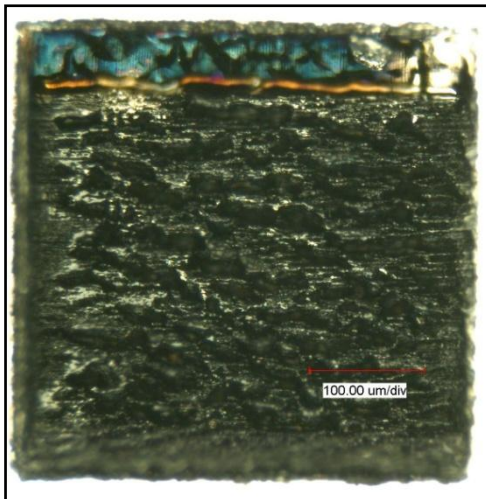


Abb. 6.19: Flächenabtrag für 5,0 J/cm², 50 Hz, Pulsüberlapp 98 %, 2 Überfahrten.

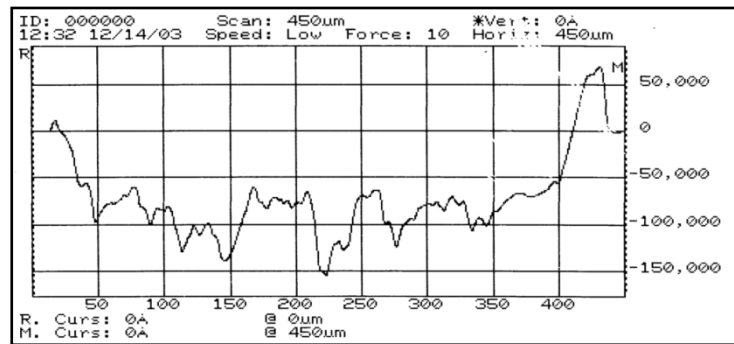


Abb. 6.20:
Oberflächenlinienprofil für die in
Abbildung 6.19 dargestellte Struktur,
gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.

6.4 Erzeugung von Gitterstrukturen in 50 µm dicker Tantalfolie

Für die Tantalfolie wurde wie bei der 5 µm dicken Edelstahlfolie zunächst versucht, Stegbreiten von 70 µm zu erzeugen. Bei den Versuchen, einen Durchschuss zu realisieren, stellte sich dieser für eine Pulswiederholfrequenz von 50 Hz bei einer Fluenz von 6,0 J/cm² ab ca. 12000 Pulsen ein, bei einer Fluenz von 8,0 J/cm² ab ca. 5000 Pulsen. Zur Herstellung der Gitterstrukturen wurden schließlich 7000 Pulse bei 8,0 J/cm² und anschließend 20000 Pulse bei 12,0 J/cm² (50 Hz Pulswiederholfrequenz) genutzt. Die Aufnahmen am REM zeigen dabei deutlich eine Entstehung von Oxidschichten an den Stegen. Eine Nachbearbeitung der erzeugten Gitterstrukturen ist damit dringend notwendig.

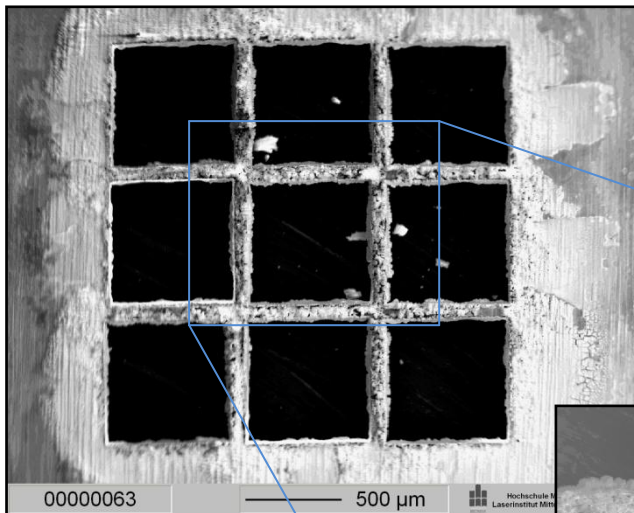
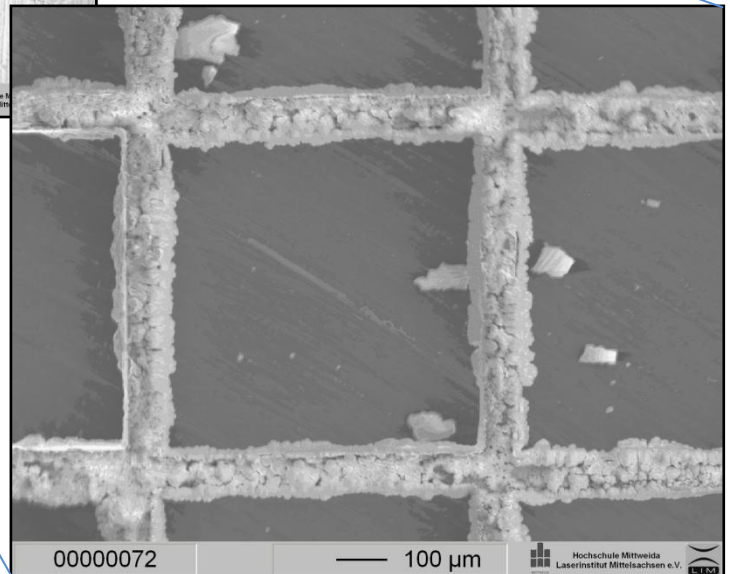


Abb. 6.21: REM-Aufnahme einer Gitterstruktur in Tantal, hergestellt mit 7000 Pulsen bei 8,0 J/cm² + 20000 Pulsen bei 12,0 J/cm² (50 Hz).



Ein erster Versuch, die Gitterstrukturen mittels Ionenstrahlätzen zu reinigen, zeigte die prinzipielle Machbarkeit mit Hilfe dieses Verfahrens. Für eine Ionenenergie von 6 keV und einem Ionenstrom von 250 µA bei einer Bearbeitungsdauer von 1 h wurde folgendes Ergebnis erzielt:

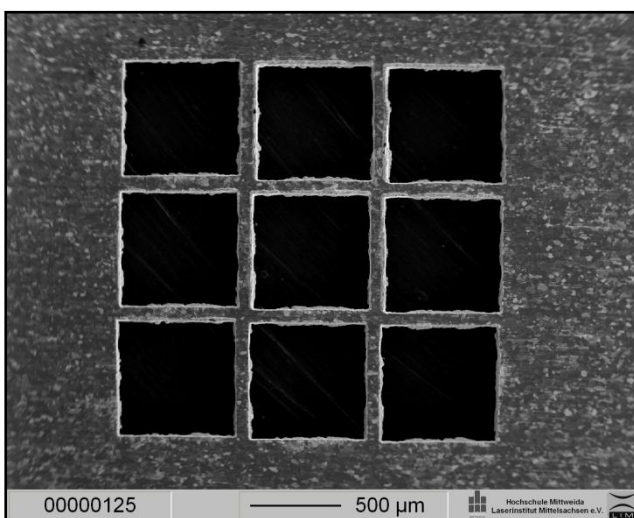
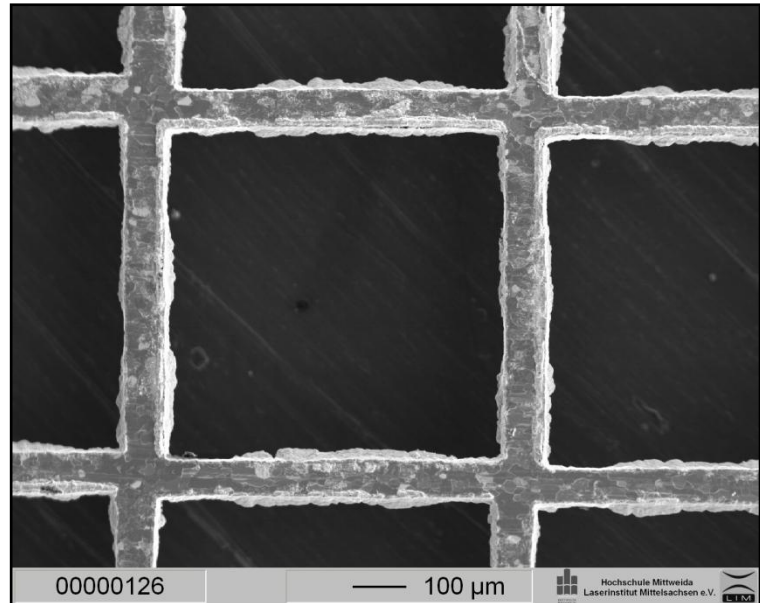


Abb. 6.22: REM-Aufnahme der in Abbildung 6.21 dargestellten Struktur nach dem Ionenätzen bei 6 keV Ionenenergie, 250 µA Ionenstrom und einer Bearbeitungsdauer von 1 h.

Abb. 6.23:
REM-Aufnahme der in Abbildung 6.21
dargestellten vergrößerten Bereichs
nach dem Ionenätzen bei 6 keV
Ionenenergie, 250 μ A Ionenstrom und
einer Bearbeitungsdauer von 1 h.



Die Oxidschichten auf den Stegen konnten entfernt werden, die an den Stegrändern nur teilweise. Für die Reinigung der Gitterstrukturen mittels Ionenstrahlätzen müssen allerdings noch geeignete Parameter gefunden werden, da noch keine Erfahrungen für den Einsatz dieses Verfahrens bei Tantal gemacht wurden.

Der durch das Ionenstrahlätzen verursachte Abtrag konnte zum Zeitpunkt der Diplomabgabe noch nicht ermittelt werden.

7 Versuche zur Minimierung des Reibungskoeffizienten bei Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365

Reibung und Verschleiß fügt der Volkswirtschaft Deutschlands geschätzte 35 Mrd. €/Jahr Verlust zu. Mit der Umsetzung des heutigen tribologischen Wissens würden sich dabei rund 5 Mrd. €/Jahr einsparen lassen [28]. Doch nicht nur aufgrund der wirtschaftlichen Verluste besteht der Anreiz, auf dem Gebiet der Tribologie weiter zu forschen. Geringere Reibungsverluste bieten neben dem geringeren Verschleiß den Vorteil, die Leichtläufigkeit zwischen zwei Komponenten zu verbessern, wodurch höhere Relativgeschwindigkeiten zueinander realisiert werden können und damit die Möglichkeit besteht, mechanische Verfahren zu beschleunigen. Ein weiterer technologischer Fortschritt wäre damit möglich.

Die Beschichtung von Stahl mit ultraharten Kohlenstoffschichten wie a-C:H (amorpher, wasserstoffhaltiger Kohlenstoff) und ta-C (tetraedrisch amorpher Kohlenstoff) ist ein Kernpunkt heutiger tribologischer Forschungen, da sie zwei wesentliche Vorteile besitzen: Durch ihre Härte besitzen sie einen sehr hohen Widerstand gegen abrasiven Verschleiß und aufgrund ihrer geringen Adhäsion einen von Natur aus geringeren Reibungswiderstand. In Verbindung mit speziellen Schmierstoffen lässt sich der Reibungswiderstand weiterhin minimieren.

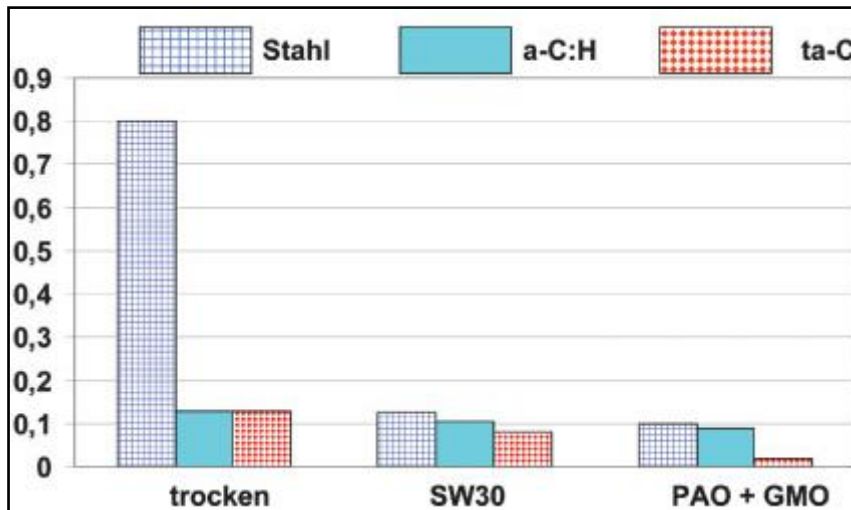


Abb. 7.1: Reibungszahl von Stahl, a-C:H und ta-C gegen Stahl in Motoröl SW30 und in optimiertem Schmieröl (PAO mit GMO-Zusatz) für eine Gleitgeschwindigkeit von 0,03 m/s [29].

Ziel der Versuche ist es, Strukturen im Stahl zu erzeugen, die im Zusammenspiel mit einer ta-C-Beschichtung und Schmierstoffen zu einer weiteren Verringerung der Reibung führen. Durch die Strukturen wird sich erhofft, eine zu schnelle lokale Verdrängung des Schmiermittels in weniger belastete Nachbarbereiche zu verhindern und den Strömungswiderstand des Schmiermittels zu minimieren.

Als Ausgangspunkt für die Versuche sollten quadratische Noppenstrukturen dienen, die durch versetzte Linienstrukturierungen erzeugt werden sollten.

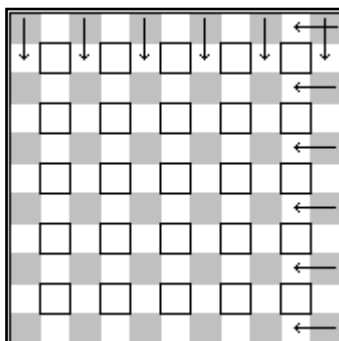


Abb. 7.2: Schematische Erzeugung der Noppenstrukturen. Graue Bereiche sind durch die Überlagerung der waagrecht und senkrecht verlaufenden Linienabträge Bereiche höherer Abtragstiefe.

Im Vorfeld mussten für die Erzeugung der Noppenstrukturen Versuche zum Linienabtrag gefahren werden. Diese wurden mit der Maske der Abmaße 0,49 mm x 0,49 mm durchgeführt. Für eine Pulswiederholfrequenz von 50 Hz wurden bei den Fluenzen 3,0 J/cm², 4,0 J/cm² und 5,0 J/cm² Linienstrukturen mit folgenden Parametern erzeugt:

- Pulsüberlapp 90 %: 1, 2, 5, 10, 20, 40 Überfahrten
- Pulsüberlapp 95 %: 1, 5, 10, 20 Überfahrten
- Pulsüberlapp 98 %: 1, 2, 4, 8 Überfahrten
- Pulsüberlapp 99 %: 1, 2, 4 Überfahrten.

Bei einem Linienabtrag mit einem Pulsüberlapp von 99 % und 4 Überfahrten wird beispielsweise die selbe Streckenenergie wie für einen Linienabtrag bei einem Pulsüberlapp von 98 % (95%, 90 %) und 8 (20, 40) Überfahrten aufgewendet, wodurch sich diese Linienabträge untereinander noch einmal vergleichen ließen. Die ermittelten Abtragstiefen befinden sich in der Anlage 2.

Für die Herstellung der Noppenstrukturen wurden nach Vergleich der Ergebnisse folgende Parameter gewählt: Pulsüberlapp 98 %, Fluenz 5,0 J/cm², Pulswiederholfrequenz 50 Hz, 8 Überfahrten.

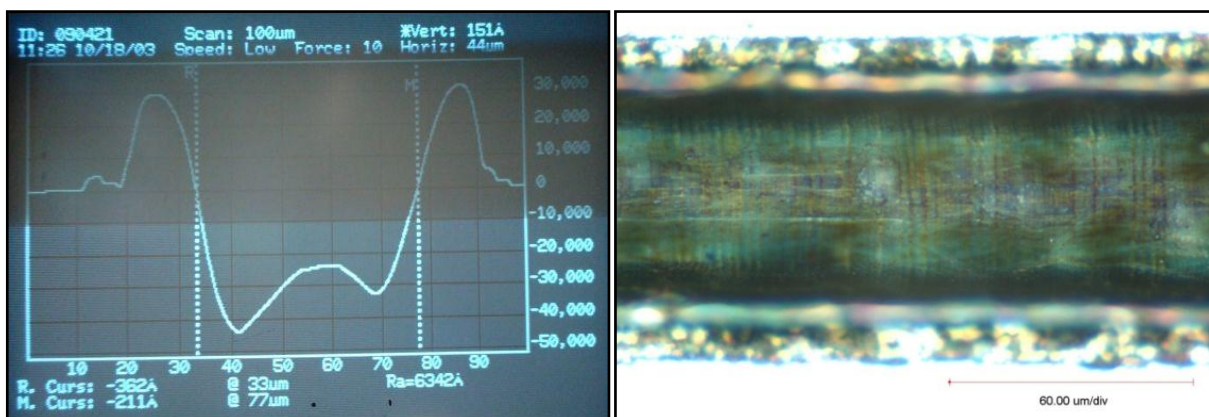


Abb. 7.3: Linienabtrag für Pulsüberlapp 98 %, Fluenz 5,0 J/cm², Pulswiederholfrequenz 50 Hz, 8 Überfahrten (links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030, rechts: digitalmikroskopische Aufnahme des Strukturbodens).

Die bei der Erzeugung der Quadratnoppen entstandenen Aufwürfe an den Noppenrändern sind für die Haftung der ta-C-Schichten nicht förderlich, weshalb die Struktur einer Nachbearbeitung bedarf. Ein Schleifen der Probe mit einer 4000-er Körnung hatte zur Folge, dass die Linienstrukturen zugesetzt wurden, wodurch die Probe nicht mehr zu gebrauchen war. Neu gefertigte Strukturen sollen mit Hilfe eines elektrochemischen Abtrags nachbearbeitet werden. Dabei bildet das Werkstück die Anode einer elektrochemischen Zelle. Aufgrund von Spannungsspitzen an den der Kathode am nächsten gelegenen Bereichen würden die Aufwürfe zuerst abgetragen werden, ohne dass dabei ein Zusetzen der Linienstrukturen erfolgen würde. Zum Zeitpunkt der Diplomabgabe konnte eine Durchführung dieser Variante noch nicht erfolgen.

8 Theorie zu Rotationsmasken

Die neueste Komponente der Mikrostrukturierungsanlage ist eine Maskenhalterung, bei der die Maske durch eine elektronische Ansteuerung während der Bearbeitung mit einer definierten Geschwindigkeit um ihre Achse gedreht werden kann. Daraus ergibt sich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für die Erzeugung rotationssymmetrischer Geometrien.

Für einen Stempel, der mittels Abformung aus einer durch einen ArF-Excimerlaser erzeugten Struktur in Saphir erzeugt werden sollte, hat das Laboratium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Laser Zentrum Hannover e.V. ein derartiges Verfahren eingesetzt:

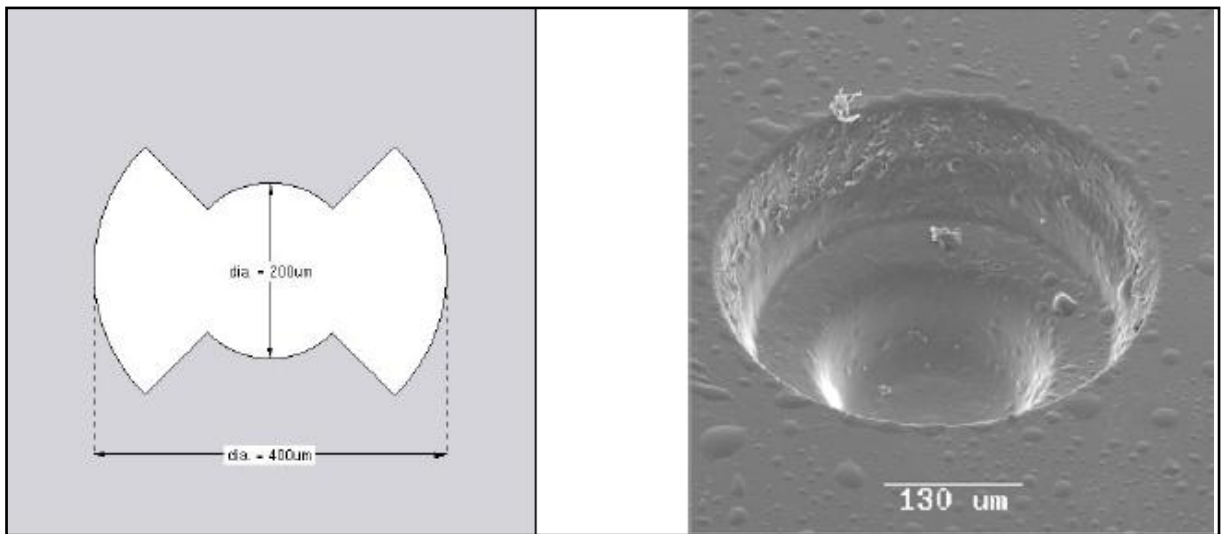


Abb. 8.1: Rotationsmaske mit erzielter Struktur in Saphir durch einen ArF-Excimerlaser [30].

Für zukünftige Versuche an der KrF-Mikrostrukturierungsanlage wurden Überlegungen für weitere Strukturierungsmöglichkeiten mit solch einer Maskenhalterung angestellt. Zur Erzeugung einer kegelförmigen Struktur wäre zum Beispiel eine Maske der Form erforderlich, wie sie skizzenhaft in Abbildung 8.2 dargestellt ist.

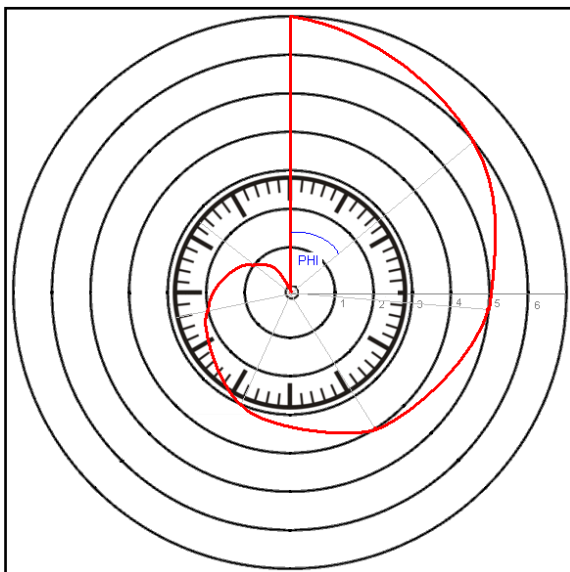


Abb. 8.2: Skizze für die Form einer rotationssymmetrischen Maske, mit der kegelförmige Strukturen hergestellt werden könnten. Die rot eingerahmte Fläche entspricht dabei dem Bereich der Durchtrittsöffnung des Laserstrahls.

Grundlegend für die in Abbildung 8.2. skizzierte Maske ist ein gleichmäßiger Abtrag über die gesamte Tiefe der zu erzeugenden Struktur. Dabei würde sich bei einer kompletten Umdrehung der Maske für die Kegelspitze der Tiefe T eine prozentuale Belichtungsdauer von 100 % ergeben, für den Radius des Kegels mit der Tiefe $T' = 0$ eine prozentuale Belichtungsdauer von 0 %. Da sich bei einem Kegel $(r - r')$ zu r verhält wie die Tiefe T' zu T (s. Abbildung 8.3), ergibt sich für einen beliebigen Radius r' bei einer konstanten Abtragsrate damit die prozentuale Belichtungsdauer t' zu:

$$t' = \frac{r - r'}{r} \quad (\text{Gl. 9}).$$

Eine komplette Umdrehung der Maske entspricht einem Winkel von 360° . Nimmt man den Mittelpunkt des Kegels als Koordinatenursprung, verhalten sich dadurch die 360° zu der prozentualen Belichtungsdauer von 100 % wie der in Abbildung 8.2 eingezeichnete Winkel φ zu t' . Umgestellt ergibt sich daher für den Winkel φ :

$$\varphi = \frac{r - r'}{r} \cdot 360^\circ \quad (\text{Gl. 10}).$$

Die für eine Herstellung der Maske benötigten x- und y-Koordinaten ergeben sich schließlich durch

$$\sin \varphi = \frac{x_{r'}}{r'} \quad (\text{Gl. 7}) \quad \text{und} \quad \cos \varphi = \frac{y_{r'}}{r'} \quad (\text{Gl. 11})$$

zu

$$x_{r'} = r' \cdot \sin \varphi = r' \cdot \sin \left(\frac{r - r'}{r} \cdot 360^\circ \right) \quad (\text{Gl. 12})$$

und

$$y_{r'} = r' \cdot \cos \varphi = r' \cdot \cos \left(\frac{r - r'}{r} \cdot 360^\circ \right) \quad (\text{Gl. 13}).$$

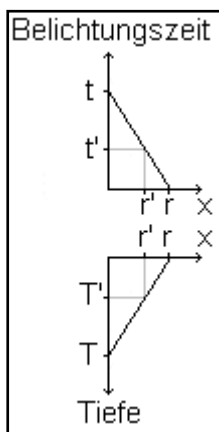


Abb. 8.3: Abhängigkeit der Belichtungsdauer vom Radius für eine kegelförmige Strukturierung (oben) mit der dabei erzeugten Strukturtiefe (unten) bei einer konstanten Abtragsrate.

Für eine konstante Abtragsrate über die gesamte Belichtungsdauer wäre damit auch vorstellbar, Masken für verschiedene Strukturgeometrien zu berechnen, deren rotationssymmetrisches Profil mit Hilfe einer mathematischen Gleichung beschreibbar ist. Die tatsächliche Strukturierungstiefe ergibt sich dabei aus dem Produkt der Abtragsrate und der Zeit der Belichtung, die durch die Rotationsgeschwindigkeit und

der Anzahl der Umdrehungen der Maske vorgegeben werden kann. Für eine beispielsweise zu erzeugende maximale Tiefe der Kegelstruktur von $1 \mu\text{m}$ ergibt sich bei einer Abtragsrate von 100 nm/s somit eine Belichtungsdauer von 10 s für den Radius 0.

Vor allem bei tieferen Bereichen einer Struktur ergibt sich aufgrund der Defokussierung des Laserstrahls eine Verringerung der Abtragsrate. Ermittelt man die durchschnittliche Abtragsrate der dazugehörigen Abtragstiefen, kann die Kurve für die Abhängigkeit der durchschnittlichen Abtragsrate von der Abtragstiefe berechnet werden. Ergibt sich hierfür beispielsweise für die Abtragsrate A die Formel

$$A = A_0 \cdot e^{-0,5 \mu m^{-1} \cdot T'} \quad (\text{Gl. 14})$$

(wobei T' für die Abtragstiefe beim Radius r' und A_0 für die Abtragsrate bei der Tiefe $T' = 0$ steht), ergibt sich für das Beispiel der Kegelstruktur mit einer maximalen Tiefe von $1 \mu m$ und einer Abtragsrate A_0 von 100 nm/s eine durchschnittliche Abtragsrate von rund $60,7 \text{ nm/s}$ und damit eine Belichtungszeit von rund 16 s .

Um zu einer Form zu gelangen, mit der durch vorgegebene Koordinaten die entsprechende Maske hergestellt werden kann, benötigt man wieder die prozentuale Belichtungsdauer t' für den jeweiligen Radius r' . Die prozentuale Belichtungsdauer t' ergibt sich dabei aus dem Quotienten der Belichtungszeit der Tiefe T' und der Belichtungszeit für die maximale Tiefe T :

$$t' = \frac{\frac{\frac{r-r'}{r} \cdot T}{A_0 \cdot e^{-0,5 \cdot \frac{r-r'}{r} \cdot T}}}{\frac{T}{A_0 \cdot e^{-0,5 \cdot T}}} = \frac{r-r'}{r} \cdot e^{-0,5 \cdot T \cdot (1 - \frac{r-r'}{r})} \quad (\text{Gl. 15}).$$

Die Koordinaten werden analog der Verfahrensweise der Gleichungen 9 bis 13 berechnet.

Wie man sieht, wäre die prozentuale Belichtungsdauer für diesen Fall abhängig von der maximalen Tiefe, die man erreichen will. Jede zu erzeugende Kegelstruktur mit einer bestimmten Tiefe würde damit eine eigene Maske benötigen.

Eine so für die Masken berechnete Form schafft nur im Idealfall die gewünschte Struktur. Die physikalischen Vorgänge bei der Ablation des Materials sind zu komplex, um sie in einer mathematischen Form auszudrücken. Versuchsdurchführungen sind für eine Optimierung der Masken von Notwendigkeit.

Eine weitere Maskenform und die mit ihr erzeugbare Strukturierung sieht wie folgt aus:

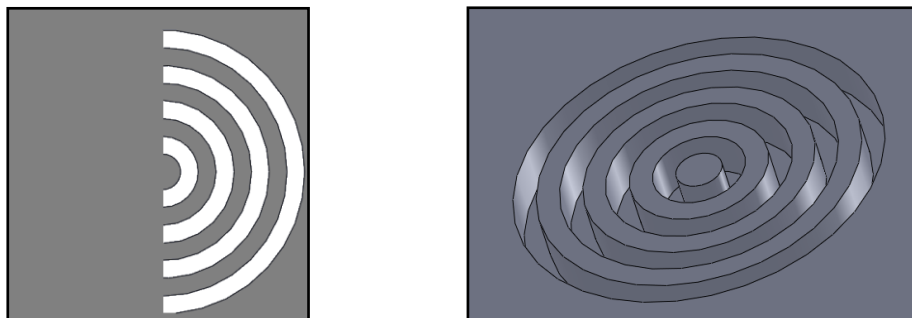


Abb. 8.4: Zeichnung einer Rotationsmaske mit der für sie theoretisch erzeugbaren Strukturierung.

Diese Strukturierung und Variationen davon könnten vor allem für den Bereich optischer Gitter und diffraktiver optischer Elemente eingesetzt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Abtragsuntersuchungen der Materialien ergaben, dass ein definierter Abtrag in TOPAS 5013 nicht möglich ist.

Für D 263 T steht die Rissbildung bei der Bearbeitung einem Einsatz des KrF-Excimerlasers entgegen. Möglicherweise könnte eine Rissbildung verhindert werden, indem man das zu bearbeitende Material erhitzt, womit sich Spannungen schneller abbauen können. Auch im Erfolgsfall wäre ein Einsatz des KrF-Excimerlasers hierbei unzweckmäßig, da diese Methode mit einem hohen Aufwand verbunden wäre.

Bei der Strukturierung des Werkzeugstahls der Werkstoffnummer 1.2365 bilden sich starke Aufwürfe an den Strukturrändern. Eine Nachbearbeitung von erzeugten Strukturen ist dabei erforderlich. Eine geeignete Methode dafür wird noch gesucht. Ergebnisse der in Kapitel 7 angesprochenen Nachbehandlung mittels elektrochemischen Abtrags stehen noch aus.

Auch für die Erzeugung der Gitterstrukturen in Tantal- und Edelstahlfolie ist eine Nachbehandlung erforderlich. Eine Möglichkeit hierfür bietet das Ionenstrahlätzen. Ergebnisse der Nachbehandlung stehen für die Edelstahlfolie noch aus. Bei einem ersten Ergebnis zeigte sich eine prinzipielle Machbarkeit der Nachbehandlung für die Tantalfolie, weitere Untersuchungen zu einer Optimierung der Ätzparameter sind dabei noch notwendig.

Die neue Maskenhalterung für rotierende Masken bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Für die in Kapitel 8 beschriebenen theoretischen Erläuterungen möglicher Formen und deren Herstellung fehlen noch jegliche praktische Versuche.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Titel	Seite
Abb. 3.1	Schematischer Verfahrensablauf zur Strukturdefinition mittels Fotolithografie (subtraktive Methode).	3
Abb. 3.2	Grundlegende Prozessschritte der LIGA-Technik 1) Aufbringen eines röntgenempfindlichen Resists auf eine Grundplatte 2) Bestrahlung mit Synchrotronstrahlung (Röntgenstrahlung) 3) Entwicklung des Resists 4) Galvanische Metallabscheidung 5) Entfernen des unbelichteten Resists 6) Abformung der Metallstruktur.	5
Abb. 3.3	Vereinzelttes Mikrozahnrad aus Nickel mit einem Kopfkreisdurchmesser von ca. 550 μm und einem Rauheitswert $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ [7].	6
Abb. 3.4	Polypropylen-Teile für die Medizintechnik mit einem Teilgewicht von 0,001 g [8].	6
Abb. 3.5	Droplets auf einem 30 μm -Mikrobohrer [10].	7
Abb. 3.6	Detail eines 30 μm -Mikrofräasers von Hitachi mit leichter Droplet-Bildung der Th45+-Beschichtung [10].	7
Abb. 3.7	Grabenstruktur mit ca. 15 μm Breite und einer Tiefe von mehr als 150 μm , hergestellt durch Mikrohobeln in PMMA [10].	7
Abb. 3.8	Bohrung in Edelstahl mit einem Durchmesser von 25 μm [10].	8
Abb. 3.9	Mikroformelektrode zur Erzeugung von drei RechteckEinstichen in einer Bohrung mit einem Durchmesser von 0,6 mm.	8
Abb. 3.10	Nullstrahlfänger für Synchrotron-Röntgenstrahlen, Kugeldurchmesser 0,25 mm, Tip-Durchmesser 10 μm [10].	8
Abb. 3.11	Lichtmikroskopaufnahmen der Schlifffbilder einer erzeugten Struktur in Al_2O_3 a) 350 Pulse, b) 1500 Pulse, c) 3000 Pulse und d) 4000 Pulse ($H = 20 \text{ J/cm}^2$, $f_p = 5 \text{ Hz}$) [12].	10
Abb. 3.12	Strukturierung in PMMA [13].	10
Abb. 3.13	Energiepotentiale der Edeltgashalogenide [18].	12
Abb. 3.14	Schema eines Excimerlasers, der mit einer elektrischen Entladung gepumpt wird [18].	13
Abb. 4.1	Aufbau der verwendeten Excimerlaser-Mikrobearbeitungsanlage.	15
Abb. 4.2	Transmissionskurve von D 263 T bei einer Dicke von 0,15 mm [21].	17
Abb. 4.3	Chemischer Aufbau von TOPAS COC [23].	17
Abb. 4.4	Lichttransmissionskurve für eine 2 mm dicke Scheibe aus TOPAS 5013L-10 und 5013LS-01 [24].	18
Abb. 5.1	Parameterfeld für die Abtragsuntersuchungen bei TOPAS 5013.	22
Abb. 5.2	Abtrag für 1,5 J/cm^2 , 1 Hz, 10 Pulse (Maske 1 mm x 1 mm); links: Digitalmikroskopische Aufnahme, 500-fache Vergrößerung, rechts: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	23
Abb. 5.3	Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses bei 4,0 J/cm^2 und 200 Pulsen bei einer Pulswiederholfrequenz von 1 Hz (links) und 50 Hz (rechts), (Maske 5 mm x 5 mm, 200-fache Vergrößerung).	23
Abb. 5.4	Digitalmikroskopische Aufnahme einer Struktur für 1,5 J/cm^2 , 50 Hz, 200 Pulse (Maske 5 mm x 5 mm, 200-fache Vergrößerung).	24

Abb. 5.5	Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses bei 4,0 J/cm ² und 200 Pulsen bei einer Pulswiederholfrequenz von 1 Hz (links) und 50 Hz (rechts) (Maske 1 mm x 1 mm, 500-fache Vergrößerung).	24
Abb. 5.6	Vergleich des optischen Bearbeitungsergebnisses für 1 Hz und 200 Pulse bei 8,0 J/cm ² (links) und 12,0 J/cm ² (rechts) (Maske 1 mm x 1 mm, 500-fache Vergrößerung).	25
Abb. 5.7	Mittels Sloan DEKTAK 3030 vermessene Oberflächenlinienprofile (links: 1,5 J/cm ² , 1 Hz, 200 Pulse; rechts: 12,0 J/cm ² , 1 Hz, 10 Pulse).	25
Abb. 5.8	Flächenabtrag von TOPAS 5013 mittels Fluorlaser (Maskenabbildung 50 µm x 50 µm, 0,5 J/cm ² , 200 Hz, Pulsüberlapp 90 %, 2 Überfahrten in X- und Y-Richtung) [27].	26
Abb. 5.9	Testfeld für die Abtragsuntersuchungen bei D 263 T mit der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm.	26
Abb. 5.10	Vergleichbare Strukturböden vor und nach mechanischer Einwirkung (links: 5,0 J/cm ² , 50 Hz, 50 Pulse; rechts: 4,0 J/cm ² , 1 Hz, 50 Pulse).	27
Abb. 5.11	Interferenzerscheinungen durch das Abheben dünner Schichten von der Grundplatte.	27
Abb. 5.12	Erste Rissbildungen für D 263 T ab 20 Pulsen bei der Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm (Fluenz: 6,0 J/cm ²).	28
Abb. 5.13	Oberflächenlinienprofil der Strukturierung von D 263 T (5 mm x 5 mm-Maske, 5,0 J/cm ² , 10 Pulse, 1 Hz), gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	28
Abb. 5.14	Strukturierung von D 263 T (2,0 J/cm ² , 25 Hz, 50 Pulse, Maske 5 mm x 5 mm); links: digitalmikroskopische Aufnahme mit Verfahrenweg der Prüfnadel, rechts: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	29
Abb. 5.15	Abtragsphänome bei D 263 T für einzelne Pulse (Maske 5 mm x 5 mm; links: 4,0 J/cm ² ; rechts: 5,0 J/cm ²)	30
Abb. 5.16	links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030; rechts: Verfahrenweg der Prüfnadel (Maske 5 mm x 5 mm, 4,0 J/cm ² , 1 Puls)	30
Abb. 5.17	Testfeld für die Abtragsuntersuchungen bei D 263 T mit der Maske der Abmaße 1 mm x 1 mm.	31
Abb. 5.18	Strukturierung von D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 2,0 J/cm ² , 1 Hz, 40 Pulse); links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030, rechts: digitalmikroskopische Aufnahme.	31
Abb. 5.19	Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 2,5 J/cm ² , 25 Hz, 80 Pulse); links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.	32
Abb. 5.20	Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 5,0 J/cm ² , 25 Hz, 30 Pulse); links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.	32
Abb. 5.21	Strukturen in D 263 T (Maske 1 mm x 1 mm, 5,0 J/cm ² 50 Hz, 30 Pulse); links: direkt nach der Bearbeitung, rechts: 2 Tage nach der Bearbeitung.	33
Abb. 5.22	links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030; rechts: Verfahrenweg der Prüfnadel (D 263 T, 1 mm x 1 mm-Maske, 5,0 J/cm ² , 25 Hz, 30 Pulse).	33
Abb. 5.23	Abtragstiefen für D 263 T bei Pulswiederholfrequenzen von 1 Hz bis 50 Hz (Maske 1 mm x 1 mm).	34
Abb. 5.24	Abtragsraten und Regression für D 263 T bei Pulswiederhol-frequenzen von 1 Hz bis 50 Hz (Maske 1 mm x 1 mm).	34

Abb. 5.25	Bohrung von D 263 T mittels Fluorlaser (3,0 J/cm ² , 200 Hz, 500 Pulse) [27].	35
Abb. 5.26	Testfeld für die Abtragsversuche des Werkzeugstahls.	36
Abb. 5.27	Abtragsraten des Werkzeugstahls bei 1 Hz (0,49 mm x 0,49 mm-Maske).	36
Abb. 5.28	Vergleich zweier Strukturen, hergestellt mit 1 Hz und 100 Pulsen (links: 4,0 J/cm ² ; rechts: 6,0 J/cm ² , Maske 0,49 mm x 0,49 mm).	37
Abb. 5.29	Erzeugte Struktur im Werkzeugstahl (4,0 J/cm ² , 1 Hz, 500 Pulse, Maske 0,49 mm x 0,49 mm).	37
Abb. 5.30	Abtragstiefen für Werkzeugstahl bei verschiedenen Parametern, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	38
Abb. 5.31	Oberflächenlinienprofile, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030 (links: 6,0 J/cm ² , 1 Hz, 500 Pulse, rechts: 7,0 J/cm ² , 1 Hz, 250 Pulse).	38
Abb. 5.32	Oberflächenprofil, gemessen mittels LSM 5 Pascal (7,0 J/cm ² , 1 Hz, 250 Pulse).	39
Abb. 5.33	Schematische Vermessung der Struktur für 7,0 J/cm ² , 1 Hz, 250 Pulse mittels Sloan DEKTAK 3030.	39
Abb. 5.34	Schematische Darstellung der Reflexion von Laserstrahlung an den Strukturwänden anhand eines Oberflächenlinienprofils, gemessen mittels LSM 5 Pascal (Bearbeitungsparameter der Struktur: 3 J/cm ² , 1 Hz, 500 Pulse).	40
Abb. 5.35	Strukturprofil für die Bearbeitungsparameter 7,0 J/cm ² , 1 Hz, 500 Pulse, gemessen mittels LSM 5 Pascal.	41
Abb. 5.36	Vergleich der ermittelten Abtragstiefen bei Werkzeugstahl für die Messsysteme Sloan DEKTAK 3030 und LSM 5 Pascal.	41
Abb. 5.37	Parameterfeld für die Sackbohrungen in 1.2365 (Bearbeitung mit 5,0 J/cm ²).	42
Abb. 5.38	Nicht auswertbare Oberflächenprofile, gemessen mittels LSM 5 Pascal (links: 6,0 J/cm ² , 1 Hz, 250 Pulse; rechts: 5,0 J/cm ² , 50 Hz, 500 Pulse).	43
Abb. 5.39	Oberflächenprofil, gemessen mittels LSM 5 Pascal (6,0 J/cm ² , 1 Hz, 50 Pulse).	43
Abb. 5.40	Ermittelte Bohrlochtiefen für die Kreismaske mit Ø 80 µm bei Werkzeugstahl.	44
Abb. 5.41	Abtragsraten und Regression für 1.2365 (Kreismaske Ø 80 µm).	44
Abb. 6.1	ovalförmige Ausbildung des Bohrloches bei 7,0 J/cm ² , 50 Hz, 700 Pulse (d = 4,1 µm).	45
Abb. 6.2	Durchlichtmikroskopische Aufnahme des Bohrloches bei 9,0 J/cm ² , 25 Hz, 700 Pulse (d = 6,8 µm).	46
Abb. 6.3	Oberfläche der Bohrung für 9,0 J/cm ² , 25 Hz, 700 Pulse.	46
Abb. 6.4	Spannvorrichtung für die Metallfolien.	46
Abb. 6.5	Durchlichtmikroskopische Aufnahme der Gratbildung bei 4,0 J/cm ² , 10 Hz, 1000 Pulsen.	47
Abb. 6.6	Gitterstrukturen, bearbeitet mit 4,0 J/cm ² , 1000 Pulse + 12,0 J/cm ² , 500 Pulse bei 50 Hz (links: ungereinigt, rechts: gereinigt).	48
Abb. 6.7	Gitterstruktur, bearbeitet mit 4,0 J/cm ² , 500 Pulse + 8,0 J/cm ² , 100 Pulse + 14,0 J/cm ² , 100 Pulse bei 10 Hz (gereinigt).	48
Abb. 6.8	REM-Aufnahme eines Gitterkreuzes, Bearbeitungsparameter 4,0 J/cm ² , 500 Pulse + 8,0 J/cm ² , 100 Pulse + 14,0 J/cm ² , 100 Pulse bei 10 Hz.	48
Abb. 6.9	Gitterstruktur mit Stegbreiten von rund 30 µm.	49

Abb. 6.10	Kaputter Steg beim Versuch der Erzeugung von 20 μm breiten Stegen aufgrund der nicht quadratischen Maße der Maske.	49
Abb. 6.11	Gitterstruktur mit Stegbreiten von rund 20 μm .	50
Abb. 6.12	Ausschnitte aus Abbildung 6.11, vergrößert dargestellt.	50
Abb. 6.13	Gitterstruktur mit rund 10 μm breiten Stegen.	51
Abb. 6.14	Gitterstruktur mit rund 30 μm breiten Stegen, hergestellt mit den Parametern 6,0 J/cm ² , 5000 Pulse + 8,0 J/cm ² , 20000 Pulse bei 50 Hz Pulswiederholfrequenz.	51
Abb. 6.15	Gitterkreuz aus der in Abbildung 6.14 dargestellten Struktur.	52
Abb. 6.16	REM-Aufnahme einer Struktur, erzeugt mit 6,0 J/cm ² , 2500 Pulse, 50 Hz.	52
Abb. 6.17	Ausschnitt aus der in Abbildung 6.16 dargestellten Struktur.	53
Abb. 6.18	Oberflächenlinienprofil der Struktur für 6,0 J/cm ² , 2000 Pulse, 50 Hz, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	53
Abb. 6.19	Flächenabtrag für 5,0 J/cm ² , 50 Hz, Pulsüberlapp 98 %, 2 Überfahrten.	54
Abb. 6.20	Oberflächenlinienprofil für die in Abbildung 6.19 dargestellte Struktur, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030.	54
Abb. 6.21	REM-Aufnahme einer Gitterstruktur in Tantal, hergestellt mit 7000 Pulsen bei 8,0 J/cm ² + 20000 Pulsen bei 12,0 J/cm ² (50 Hz).	55
Abb. 6.22	REM-Aufnahme der in Abbildung 6.21 dargestellten Struktur nach dem Ionenätzen bei 6 keV Ionenenergie, 250 μA Ionenstrom und einer Bearbeitungsdauer von 1 h.	55
Abb. 6.23	REM-Aufnahme der in Abbildung 6.21 dargestellten vergrößerten Bereiche nach dem Ionenätzen bei 6 keV Ionenenergie, 250 μA Ionenstrom und einer Bearbeitungsdauer von 1 h.	56
Abb. 7.1	Reibungszahl von Stahl, a-C:H und ta-C gegen Stahl in Motoröl SW30 und in optimiertem Schmieröl (PAO mit GMO-Zusatz) für eine Gleitgeschwindigkeit von 0,03 m/s [29].	57
Abb. 7.2	Schematische Erzeugung der Noppenstrukturen. Graue Bereiche sind durch die Überlagerung der waagrecht und senkrecht verlaufenden Linienabträge Bereiche höherer Abtragstiefe.	57
Abb. 7.3	Linienabtrag für Pulsüberlapp 98 %, Fluenz 5,0 J/cm ² , Pulswiederholfrequenz 50 Hz, 8 Überfahrten (links: Oberflächenlinienprofil, gemessen mittels Sloan DEKTAK 3030, rechts: digitalmikroskopische Aufnahme des Strukturbodens).	58
Abb. 8.1	Rotationsmaske mit erzielter Struktur in Saphir durch einen ArF-Excimerlaser [30].	59
Abb. 8.2	Skizze für die Form einer rotationssymmetrischen Maske, mit der kegelförmige Strukturen hergestellt werden könnten. Die rot eingerahmte Fläche entspricht dabei dem Bereich der Durchtrittsöffnung des Laserstrahls.	59
Abb. 8.3	Prozentuale Belichtungsdauer in Abhängigkeit vom Radius für eine kegelförmige Strukturierung (oben) mit der dabei erzeugten prozentualen Tiefe der Struktur (unten) bei einer konstanten Abtragsrate.	60
Abb. 8.4	Zeichnung einer Rotationsmaske mit der für sie theoretisch erzeugbaren Strukturierung.	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Titel	Seite
1	Mikrobearbeitungsverfahren und ihre Mikrostrukturierungsmöglichkeiten.	11
2	Parameterbereiche der zurzeit kommerziell angebotenen Excimerlaser.	14
3	Parameter der im Bezug auf die max. Durchschnittsleistung stärksten zurzeit kommerziell angebotenen Excimerlaser.	14
4	Technische Daten von D 263 T [20].	16
5	Eigenschaften von Tantal.	18
6	Chemische Zusammensetzung des Werkzeugstahls 1.2365 in Gewichts-% nach [25].	19
7	Physikalische Eigenschaften des Werkzeugstahls 1.2365 nach [25].	19
8	Chemische Zusammensetzung des Edelstahl 1.4301 in Gewichts-% [26].	20
9	Physikalische Eigenschaften des Edelstahl 1.4301 nach [26].	20
10	Auftreten von Mikrorissen bei den Strukturen für die Maske der Abmaße 5 mm x 5 mm zwei Tage nach der Bearbeitung.	32
11	Bohrlochdurchmesser für 7,0 J/cm ² und 50 Hz.	45
















Literaturverzeichnis

- [1] Ehrfeld, Wolfgang
Handbuch Mikrotechnik
Hanser Verlag ISBN: 3-446-21506-9 (2002)
Seite V
- [2] Französisches Informationszentrum für Industrie und Technik
URL: <http://www.openpr.de/pdf/168129/Mikrotechnik-im-Zentrum-der-Kompetenzen.pdf>
verfügbar am 13.10.09
- [3] Intel Corporation
URL: <http://www.intel.com/cd/corporate/pressroom/emea/deu/410929.htm>
verfügbar am 13.10.09
- [4] Photonik 6/2008 – Fachzeitschrift für die optischen Technologien
S. 54-56
- [5] Forschungszentrum Karlsruhe
URL: http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=TTB&sid=UMYoNdHVaq2TL2pKyG4yLi31XQ4%3D&document=ID_054624&rnode=3466
verfügbar am 13.10.09
- [6] Forschungszentrum Karlsruhe
URL: http://www.fzk.de/fzk/groups/nanomikro/documents/internetdokument/id_055391.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [7] Technologien und Werkstoffe der Mikro- und Nanosystemtechnik
GMM-Workshop vom 7. Bis 8. Mai 2007 in Karlsruhe
S. 74/75
VDE Verlag
- [8] DEMAG Plastics Group
URL: http://www.sumitomo-shi-emag.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/Technologien_-_Download/TP_Mikrospritzgiessen_de.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [9] K. Baier, M. Lehdorff, A. Katz
„Konzepte für erfolgreiche Mikrozerspanung“
Mikroproduktion 1/2004, S. 27-29

- [10] Technologien und Werkstoffe der Mikro- und Nanosystemtechnik
GMM-Workshop vom 7. Bis 8. Mai 2007 in Karlsruhe
S. 119-127
VDE Verlag
- [11] Diamond Business 4/2008 – Das Magazin für Diamantanwendungen
S. 6-10
- [12] Laserinstitut Mittelsachsen e.V.
URL: http://laz.htwm.de/3_forschung/20_mikro/beispiele/default.asp?content=_Abtrag.html
verfügbar am 13.10.09
- [13] Jens Albert
Mikrostrukturierung mittels Excimerlaser
Diplomarbeit, Juli 2000
- [14] Laserinstitut Mittelsachsen e.V.
URL: http://laz.htwm.de/3_forschung/20_mikro/beispiele/default.asp?content=_Glasbohren.html
verfügbar am 13.10.09
- [15] Forschungszentrum Karlsruhe
URL: http://hikwww9.fzk.de/imf3/vorhaben/prozess/pvt_welcome_dateien/pvt/wv_mikroguss.htm
verfügbar am 13.10.09
- [16] Technologien und Werkstoffe der Mikro- und Nanosystemtechnik
GMM-Workshop vom 7. Bis 8. Mai 2007 in Karlsruhe
S. 185-191
VDE Verlag
- [17] Nanonex Corporation
URL: <http://www.nanonex.com/technology.htm>
verfügbar am 13.10.09
- [18] J. Bille, W. Schlegel
Medizinische Physik 3
Medizinische Laserphysik
2005
S. 287-289
Springer Berlin Heidelberg
ISBN 978-3-540-65255-7

- [19] Jens Albert
Mikrostrukturierung mittels Excimerlaser
Diplomarbeit, Juli 2000
S. 17
- [20] SCHOTT AG
URL: http://www.schott.com/special_applications/german/products/thin_glass/d263t.html?highlighted_text=D%20263%20T
verfügbar am 13.10.09
- [21] Präzisions Glas & Optik GmbH
URL: http://www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/D263_kurve.html
verfügbar am 13.10.09
- [22] TOPAS Advanced Polymers GmbH
URL: http://www.topas.com/products-topas_coc
verfügbar am 13.10.09
- [23] TOPAS Advanced Polymers GmbH
URL: http://www.topas.com/optical_en_080603.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [24] TOPAS Advanced Polymers GmbH
URL: http://www.topas.com/topas_brochure_english.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [25] Schmidt + Clemens GmbH + Co. KG
URL: http://www.schmidt-clemens.com/vnoffice/data/0/0/1/221/2365_D_220107.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [26] Lamineries Matthey SA
URL: http://www.matthey.ch/fileadmin/user_upload/downloads/fichetechnique/DE/1.4301.pdf
verfügbar am 13.10.09
- [27] Bertram, René: Bearbeitungsergebnisse
- [28] Gesellschaft für Tribologie
URL: <http://www.gft-ev.de/tribologie.htm>
verfügbar am 13.10.09
- [29] Wiley InterScience
URL: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/117905486/PDFSTART>
verfügbar am 13.10.09
- [30] 2. Kolloquium Prozessskalierung, Bremen, 09./10.11.2005
URL: www.mikromaschinenbau.com/terzi/Terzi_05_Bremen.pdf
verfügbar am 13.10.09

Anlage 1: Ergebnisse der Bohrlochversuche bei 5 µm dicker Edelstahlfolie der Werkstoffnummer 1.4301.

Fluenz in J/cm ²	Pulswiederhol- frequenz in Hz	Puls- anzahl	Bohrlochdurchmesser in µm	Durchlichtmikrosko- pische Aufnahme
5,0	1	1000	2,8	
5,0	25	1000	Kein Durchschuss	
5,0	50	1000	Kein Durchschuss	
7,0	1	1000	5,3	
7,0	25	1000	5,2	
7,0	50	1000	5,1	
7,0	50	400	2,6	
7,0	50	500	3,3	
7,0	50	600	4,0	
7,0	50	700	3,6	
7,0	50	800	4,1	
7,0	50	900	4,8	
9,0	25	500	5,9	
9,0	25	600	6,3	
9,0	25	700	6,8	
10,0	25	500	6,1	
10,0	25	600	6,3	
10,0	25	700	6,6	
10,0	1	600	6,3	
8,5	50	600	5,9	

Anlage 2: Ergebnisse der Linienabträge im Werkzeugstahl der Werkstoffnummer 1.2365.

Fluenz in J/cm ²	Pulsüberlapp in %	Überfahrten	Abtragstiefe in µm	Aufwurf am Rand in µm
3,0	90	1	-0,02	k.A.
3,0	90	2	-0,07	0,22
3,0	90	5	-0,01	0,27
3,0	90	10	0,17	0,46
3,0	90	20	0,37	0,92
3,0	90	40	0,60	1,10
3,0	95	1	-0,04	0,23
3,0	95	5	0,19	0,61
3,0	95	10	0,20	0,83
3,0	95	20	0,64	2,20
3,0	98	1	0,04	0,44
3,0	98	2	0,14	0,74
3,0	98	4	0,47	0,75
3,0	98	8	0,61	0,93
3,0	99	1	0,20	0,68
3,0	99	2	0,15	0,91
3,0	99	4	0,34	1,30
4,0	90	1	-0,02	0,14
4,0	90	2	-0,06	0,43
4,0	90	5	0,11	0,50
4,0	90	10	0,20	0,91
4,0	90	20	1,10	2,10
4,0	90	40	1,80	2,50
4,0	95	1	-0,10	0,34
4,0	95	5	0,16	1,00
4,0	95	10	0,71	1,40
4,0	95	20	1,30	2,60
4,0	98	1	0,22	0,71
4,0	98	2	0,20	1,30
4,0	98	4	0,63	1,50
4,0	98	8	1,40	2,00
4,0	99	1	0,27	0,85
4,0	99	2	0,38	1,10
4,0	99	4	1,10	2,00
5,0	90	1	0,10	0,30
5,0	90	2	0,24	0,75
5,0	90	5	0,41	1,20
5,0	90	10	1,10	1,90
5,0	90	20	2,00	3,80
5,0	90	40	2,80	5,60
5,0	95	1	0,18	0,56
5,0	95	5	0,92	1,70
5,0	95	10	1,60	3,10

5,0	95	20	3,00	4,00
5,0	98	1	0,27	1,00
5,0	98	2	0,64	1,50
5,0	98	4	1,80	2,40
5,0	98	8	2,80	3,20
5,0	99	1	0,48	1,30
5,0	99	2	0,94	2,20
5,0	99	4	2,30	3,30

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit:

Hiermit erkläre ich, diese Arbeit selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, den 15.10.2009

Stefan Gronau